

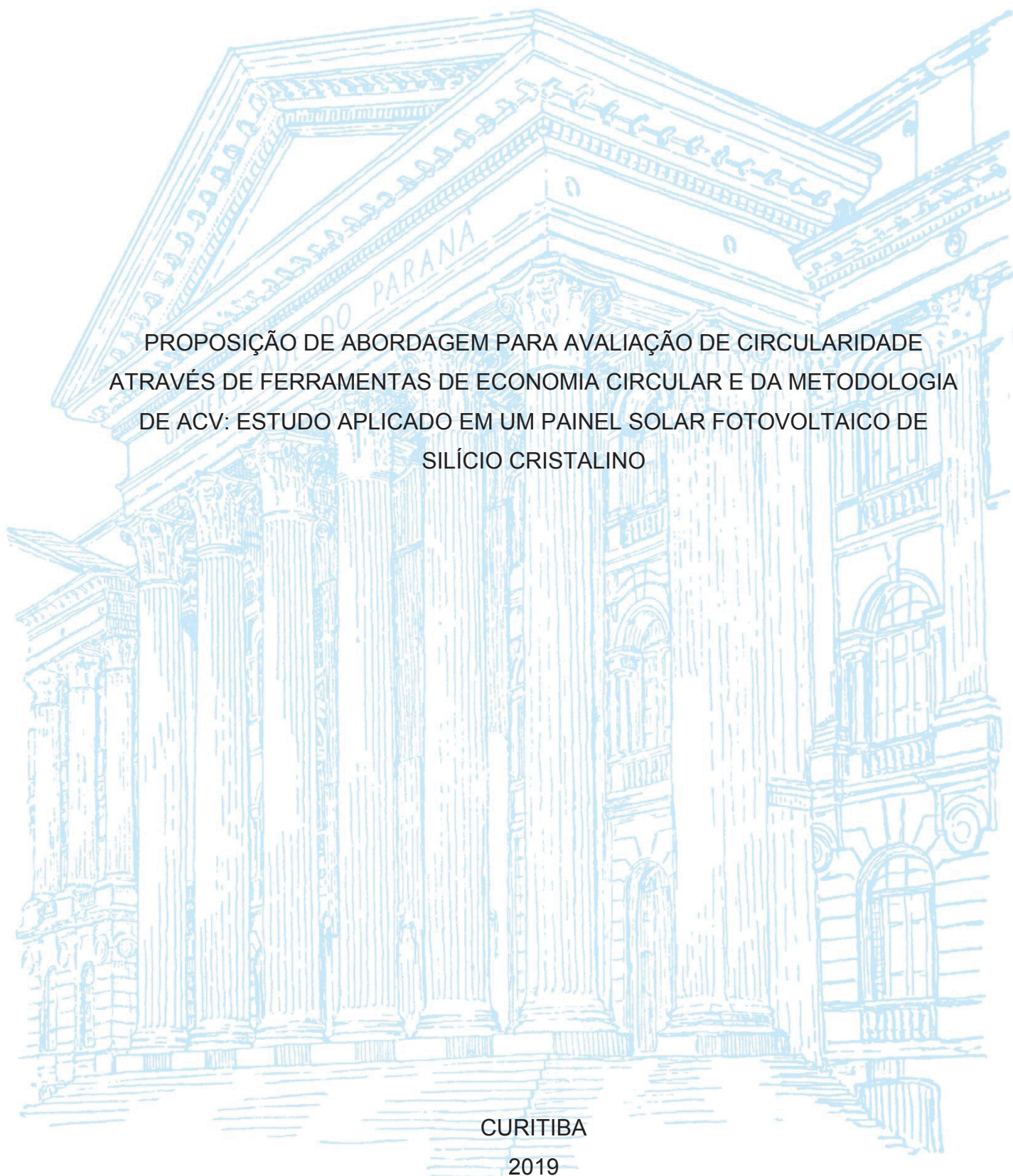
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DANIEL RODRIGUES DE OLIVEIRA

PROPOSIÇÃO DE ABORDAGEM PARA AVALIAÇÃO DE CIRCULARIDADE
ATRAVÉS DE FERRAMENTAS DE ECONOMIA CIRCULAR E DA METODOLOGIA
DE ACV: ESTUDO APLICADO EM UM PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO DE
SILÍCIO CRISTALINO

CURITIBA

2019



DANIEL RODRIGUES DE OLIVEIRA

PROPOSIÇÃO DE ABORDAGEM PARA AVALIAÇÃO DE CIRCULARIDADE
ATRAVÉS DE FERRAMENTAS DE ECONOMIA CIRCULAR E DA METODOLOGIA
DE ACV: ESTUDO APLICADO EM UM PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO DE
SILÍCIO CRISTALINO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Produção, na Área de Tecnologia e Inovação na Linha de Inovação em Projeto, Produtos e Processos. Aplicados à Engenharia de Produção, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Marcell Mariano Correa
Maceno

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

O48p

Oliveira, Daniel Rodrigues de

Proposição de abordagem para avaliação de circularidade através de ferramentas de economia circular e da metodologia de ACV: estudo aplicado em um painel solar fotovoltaico de silício cristalino [recurso eletrônico] / Daniel Rodrigues de Oliveira. – Curitiba, 2019.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Produção, 2019.

Orientador: Marcell Mariano Corrêa Maceno .

1. Geração de energia fotovoltaica. 2. Ciclo de vida do produto. 3. Energia solar. 4. Painel solar fotovoltaico. I. Universidade Federal do Paraná. II. Maceno, Marcell Mariano Corrêa. III. Título.

CDD: 621.31244


Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **DANIEL RODRIGUES DE OLIVEIRA** intitulada: **PROPOSIÇÃO DE ABORDAGEM PARA AVALIAÇÃO DE CIRCULARIDADE ATRAVÉS DE FERRAMENTAS DE ECONOMIA CIRCULAR E DA METODOLOGIA DE ACV: ESTUDO APLICADO EM UM PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO DE SILÍCIO CRISTALINO**, sob orientação do Prof. Dr. MARCELL MARIANO CORRÊA MACENO, que após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 26 de Agosto de 2019.



MARCELL MARIANO CORRÊA MACENO

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)



ROBSON SELEME

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)



CASSIANO MORO PIEKARSKI

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)



CASSIUS TADEU SCARPIN

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo dom da vida e por nunca abandonar um filho seu. Agradeço à Mariana de Freitas Rodrigues de Oliveira, minha esposa, companheira e porto seguro, sempre ao meu lado nos momentos de diversão e tristeza. Agradeço à Rafaella Laureano Scaramella Figueira da Silva sempre tão solícita. Agradeço ao Professor Dr. Rafael Kuramoto Gonzalez por me incentivar à pesquisa científica e pelos conselhos ao longo desse caminho.

Agradeço imensamente aos colegas Mestre Eng. Tiago Yuiti Kamiya, Mestre Gregori Schneider, Mestra Eng^a. Livia Maia Braga, ao Dr. Eng. Rafael Alexandre dos Reis e ao Dr. Eng. Guilherme Vinicyus Batista pelo companheirismo e por compartilharem essa jornada comigo.

Agradeço, em especial, ao Professor Dr. Eng. Marcell Mariano Correa Maceno por tudo: por compartilhar sua história, sua competência, seu conhecimento, seu tempo, sua paciência e principalmente por não ter desistido de mim. Sempre com muita educação e respeito, meu mais sincero agradecimento.

Agradeço à minha irmã Fernanda Rodrigues de Oliveira Machado e ao seu marido Regis Borges Machado meus padrinhos, pelos conselhos, por meu ouvir nas horas difíceis e pela compreensão.

Aos meus queridos pais Ari Rodrigues de Oliveira e Rosângela Andreatta da Silva de Oliveira (in memorium). Vocês se dedicaram à minha educação e fizeram de mim o que eu sou hoje.

Mais uma vez, agradeço a todos que participaram dessa trajetória.

Cada página deste trabalho tem um pouco de vocês.

Ainda que me abandonem pai e mãe, o Senhor me acolherá.”

Salmos 27:10

“Mesmo quando eu andar por um vale de trevas e morte,
não temerei perigo algum, pois tu estás comigo;”

Salmos 23:4

RESUMO

Para a Economia Circular (EC), resíduos são matérias-primas que, embora sejam de segunda-mão, apresentam considerável valor agregado. Esse é o princípio basilar da EC, modelo de produção que se contrapõe ao tradicional modelo linear de produção ditado pela sequência extração-produção-consumo-descarte de recursos, cuja característica não sustentável encontra-se em descompasso com a conjuntura global de escassez de recursos, de busca constante por otimização de processos e eficácia organizacional e de pressões sociais por um desenvolvimento mais sustentável. Assim, este estudo propõe avaliar a circularidade, por meio de ferramentas de economia circular, e mensurar os impactos ambientais potenciais, por meio da técnica ACV, de um Painel Solar Fotovoltaico (PSF) de 1ª geração, constituído de silício cristalino, Modelo 350M6K-36, fabricado no Brasil pela empresa BYD. Para tanto, foram avaliadas 31 ferramentas de circularidade em função de critérios identificados na Revisão de Literatura. Como resultado, foram escolhidos os indicadores de circularidade *Circular Economy Toolkit* (CET), *Circular Economy Indicator Prototype* (CEIP) e *Material Circularity Indicator* (MCI) para serem aplicadas ao objeto de estudo. A fim de viabilizar o estudo de caso, convencionou-se que 100% das matérias-primas utilizadas pelo objeto avaliado foram extraídas diretamente da natureza para o processo produtivo. Além disso, em função do sigilo industrial, não se teve acesso à composição química real do PSF avaliado. Assim, utilizou-se a composição química de PSFs de 1ª geração proposta por Monier e Hestin (2011) e sustentada por Dias (2015) e Paiano (2015). Do ponto de vista qualitativo, a aplicação da ferramenta CET indicou haver grande potencial de melhoria na preservação ou reparo, na reforma ou remanufatura e no desenvolvimento do produto como um serviço. Já do ponto de vista quantitativo, as ferramentas CEIP e MCI mensuraram respectivamente a circularidade do PSF avaliado em 57,2% e 44,32%. Quanto à destinação final dos resíduos do PSF avaliado, descobriu-se que 83% podem ser reciclados, 10% são incinerados (gerando valoração energética), enquanto que os 7% restantes seriam encaminhados a aterros sanitários. Quanto às matérias-primas recuperadas no processo de reciclagem de resíduos, cita-se a recuperação de 100% do alumínio, 95% do vidro, 81% do silício, 85% do cobre e 40% da prata. Por sua vez, o resultado da ACV simplificada demonstrou o impacto positivo devido ao não consumo da rede brasileira de energia é consideravelmente superior ao impacto ambiental potencial associado aos processos de fabricação (montagem) e de destinação dos resíduos do PSF avaliado. Sendo assim, o fato do PSF gerar energia localizada no local de consumo faz com que ele tenha um desempenho ambiental consideravelmente positivo. Por fim, evidenciou-se que: A ferramenta ACV permite quantificar impactos por fases e pode auxiliar a direcionar fases de implementação de ações de economia circular; Produtos podem apresentar desempenho ambiental favorável de acordo com a ACV e não necessariamente apresentarem alto grau de circularidade.

Palavras-chave: Economia Circular. Painel Solar Fotovoltaico. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

ABSTRACT

Under the Circular Economy framework, waste is considered a valuable second-hand raw material with a very high aggregate value, in contrast to the traditional view that would consider it simply like an ordinary trash. This is the main principle of EC, a production model that seeks to counterbalance the traditional linear model of production dictated by extraction-production-consumption-disposition sequence of resources whose unsustainable characteristic is in disagreement with global situation of resources scarcity, continuous search for processes optimization and organizational efficiency and social pressures for a more sustainable development. Therefore, this study proposes to evaluate the circularity, using circular economy tools, and to systematically analyze environmental impact of products, by applying the ACV methodology on a 1st generation Photovoltaic Solar Panel (PSF), consisting of monocrystalline silicon, Model 350M6K-36, manufactured in Brazil by BYD. For this, 31 circularity tools were evaluated according to the criteria identified in the Literature Review. As a result, Circular Economy Indicator Prototype (CEIP), Circularity Indicator (MCI) and Circular Economy Toolkit (CET) were selected to be applied to the study object. In order to make the case study feasible, it was agreed that 100% of the raw materials used by the evaluated object were extracted directly from nature for the production process. In addition, due to industrial secrecy, the actual chemical composition of the PSF was not accessed. Thus, the chemical composition of 1st generation PSFs proposed by Monier and Hestin (2011) and supported by Dias (2015) and Paiano (2015) was used. From a qualitative perspective, the application of the CET tool indicated that there is great potential for improvement in preservation or repair, refurbishment or remanufacturing, and product development as a service. From the quantitative point of view, the CEIP and MCI tools respectively measured the circularity of the PSF evaluated at 57.2% and 44.32%. Regarding the final disposal of the waste from the PSF evaluated, it was found that 83% can be recycled, 10% is incinerated (generating energy recovery), while the remaining 7% would be sent to landfills. The raw materials that could be recovered by the waste recycling process include the recovery of 100% aluminum, 95% glass, 81% silicon, 85% copper and 40% silver. In turn, the simplified LCA result demonstrates the positive impact due to the non-consumption of the Brazilian power grid is considerably higher than the potential environmental impact associated with the manufacturing (assembly) processes and the disposal of waste from the evaluated PSF. Therefore, the fact that the PSF generates local energy results on a considerably positive environmental performance. Final conclusions are: LCA allows to quantify impacts by stages and is able to support implementation phases of circular economy actions; Products with favorable environmental performance according to LCA not necessarily point to high circularity levels.

Key-words: Circular Economy. Photovoltaic Panels. Life Cycle Assessment (LCA).

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CONCEITOS QUE SUSTENTAM A ECONOMIA CIRCULAR.....	30
FIGURA 2 - DIAGRAMA DE BORBOLETA DA EC.....	34
FIGURA 3 - ATIVIDADES DA ECONOMIA CIRCULAR AO LONGO DO CICLO DE VALOR.....	37
FIGURA 4 - ESTRUTURA DA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA.....	49
FIGURA 5 - DADOS DE ICV.....	51
FIGURA 6 - MATERIAIS USADOS EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	55
FIGURA 7 - EMPRESAS E INSTITUTOS DE PESQUISA DO PROJETO CABRISS	61
FIGURA 8 - PASSO A PASSO DO PROJETO CABRISS.....	63
FIGURA 9 - DIAGRAMA DE BLOCOS COM AS ETAPAS DA PESQUISA	69
FIGURA 10 - CIRCULAR ECONOMY TOOLKIT (CET)	81
FIGURA 11 - MATRIZ 3X3 – VIABILIDADE FINANCEIRA X VIABILIDADE TÉCNICA	82
FIGURA 12 - CIRCULAR ECONOMY INDICATOR PROTOTYPE (CEIP).....	85
FIGURA 13 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS FLUXOS DE MATERIAIS (MCI).....	87
FIGURA 14 - MATERIAL CIRCULARITY INDICATOR (MCI)	88
FIGURA 15 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA CET NO OBJETO DO ESTUDO..	98
FIGURA 16 - MCI CALCULADO PARA O PSF M6k-36-SÉRIE 5BB DA FABRICANTE BYD	108
FIGURA 17 - MODELAGEM MATEMÁTICA DO INDICADOR MCI	109
FIGURA 18 - IRRADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA PARA A CIDADE DE CURITIBA	113
FIGURA 19 - FASE DE MONTAGEM NO SOFTWARE SIMAPRO	114
FIGURA 20 - FASE DE CICLO DE VIDA NO SOFTWARE SIMAPRO	115
FIGURA 21 - PROCESSO ENERGIA PRODUZIDA	116

FIGURA 22 - FLUXOGRAMA DA DISPOSIÇÃO FINAL DO PSF AVALIADO	117
FIGURA 23 - CENÁRIO DE DESTINO FINAL NO SOFTWARE SIMAPRO	118
FIGURA 24 - FASE DE RECICLAGEM NO SOFTWARE SIMAPRO.....	119
FIGURA 25 - DISPOSIÇÃO FINAL DO PSF AVALIADO	120
FIGURA 26 - CATEGORIA DE DANOS POR FASE DO CICLO DE VIDA - DADOS EM "mPt"	122
FIGURA 27 - CATEGORIA DE DANOS POR FASE DO CICLO DE VIDA - DADOS EM "%"	123
FIGURA 28 - FASE DE MONTAGEM - CATEGORIA DE DANOS POR FASE DO CICLO DE VIDA - DADOS EM "mPt"	124
FIGURA 29 - FASE DE MONTAGEM - CATEGORIA DE DANOS POR FASE DO CICLO DE VIDA - DADOS EM "%"	124
FIGURA 30 - ELETRICIDADE PRODUZIDA - CATEGORIA DE DANOS POR FASE DO CICLO DE VIDA - DADOS EM "mPt".....	127
FIGURA 31 - ELETRICIDADE PRODUZIDA - CATEGORIA DE DANOS POR FASE DO CICLO DE VIDA - DADOS EM "%"	127
FIGURA 32 - CENÁRIO FINAL DE RESÍDUOS - CATEGORIA DE DANOS POR FASE DO CICLO DE VIDA - DADOS EM "mPt"	129
FIGURA 33 - CENÁRIO FINAL DE RESÍDUOS - CATEGORIA DE DANOS POR FASE DO CICLO DE VIDA - DADOS EM "%"	130

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - DEFINIÇÕES DE ECONOMIA CIRCULAR.....	31
QUADRO 2 - CICLO TÉCNICO X CICLO BIOLÓGICO	34
QUADRO 3 - ESTRUTURA "RESOLVE"	36
QUADRO 4 - NÍVEIS DE ABRANGÊNCIA DA EC.....	41
QUADRO 5 - 24 ELEMENTOS DA ECONOMIA CIRCULAR SEGUNDO PARCHOMENKO et al. (2019).....	42
QUADRO 6 - CATEGORIAS E CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO DA ECONOMIA CIRCULAR SEGUNDO SAIDANI et al. (2019).....	43
QUADRO 7 - LISTA DE FERRAMENTAS DE AVALIAÇÃO DE CIRCULARIDADE ..	44
QUADRO 8 - DEFINIÇÕES.....	50
QUADRO 9 - GERAÇÕES DE PSF	54
QUADRO 10 - EFICIÊNCIA DE MERCADO DAS DIFERENTES TECNOLOGIAS DE PSF	56
QUADRO 11 - COMPOSIÇÃO DOS MÓDULOS FOTOVOLTÁICOS DE 1ª E 2ª GERAÇÃO	57
QUADRO 12 - INSTRUMENTOS DE APOIO AO SETOR FOTOVOLTAICO	58
QUADRO 13 - FABRICANTES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS NO BRASIL	59
QUADRO 14 - CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	65
QUADRO 15 - CHECKLIST DA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA.....	65
QUADRO 16 - GRUPOS E OPERADORES LÓGICOS BOOLEANOS.....	66
QUADRO 17 - ALGORITMOS DE BUSCA	68
QUADRO 18 - ALGORITMO DE BUSCA NO GOOGLE ACADÊMICO	68
QUADRO 19 - METODOLOGIAS DE ANÁLISE AMBIENTAL DE ACORDO COM OS REQUISITOS DA ECONOMIA CIRCULAR.....	71
QUADRO 20 - CRITÉRIOS ADOTADOS NA PESQUISA.....	74
QUADRO 21 - CRITÉRIOS E FERRAMENTAS.....	76

QUADRO 22 - RESULTADO DA CET SOBRE O OBJETO DE ESTUDO	78
QUADRO 23 - QUESTÕES PROPOSTAS PELA FERRAMENTA CEIP	84
QUADRO 24 - VARIÁVEIS QUE COMPÕEM A MODELAGEM MATEMÁTICA DO INDICADOR MCI.....	89
QUADRO 25 - COMPOSIÇÃO DO PSF AVALIADO.....	96
QUADRO 26 - ÁREA DE MELHORIA X POTENCIAL DE MELHORIA.....	98
QUADRO 27 - RESULTADO DA CET SOBRE O OBJETO DE ESTUDO	98
QUADRO 28 - RESULTADO DA CEIP SOBRE O OBJETO DE ESTUDO	101
QUADRO 29 - TAXA DE RECUPERAÇÃO DOS COMPONENTES DO PSF 350M6k- 36-SÉRIE 5BB DA FABRICANTE BYD.....	106
QUADRO 30 - REFLEXÃO SOBRE AS FERRAMENTAS CET, CEIP, MCI E ACV133	

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA EM JULHO DE 2018 DE ACORDO COM DADOS DISPONÍVEIS NO BANCO DE INFORMAÇÕES DE GERAÇÃO DA AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA	20
GRÁFICO 2 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA CEIP NO OBJETO DO ESTUDO	104
GRÁFICO 3 - AVALIAÇÃO DE IMPACTO POR FASE DO CICLO DE VIDA - MÉTODO IMPACT 2002+ V2.15 - PONTUAÇÃO ÚNICA.....	121
GRÁFICO 4 - CONTRIBUIÇÃO DO PROCESSO DE MONTAGEM - IMPACTOS AMBIENTAIS.....	125
GRÁFICO 5 - CONTRIBUIÇÃO DO PROCESSO DE ELETRICIDADE PROZUDIDA - IMPACTOS AMBIENTAIS	128
GRÁFICO 6 - CONTRIBUIÇÃO DO PROCESSO CENÁRIO FINAL DE RESÍDUOS - IMPACTOS AMBIENTAIS	131

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABSOLAR	- Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ACV	- Avaliação do Ciclo de Vida
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
AICV	- Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
BCG	- The Boston Consulting Group
CABRISS	- Implementation of a Circular Economy Based on Recycled, Reused and Recovered Indium, Silicon and Silver Materials For Photovoltaic and Other Applications
CC	- Circularity Calculator
CCV	- Custeio de Ciclo de Vida
CE	- Circular Economy
CED	- Cumulative Energy Demand
CEI	- Circular Economy Index
CET	- Circular Economy Toolkit
CEIP	- Circular Economy Indicator Prototype
CF	- Carbon Footprint
EC	- Economia Circular
EDP	- Ecosystem Damage Potential
EE	- Embodied Energy
EF	- Ecological Footprint
ER	- Ecological Rucksack
EY	- Ernest &Young
EMA	- Emergy Analysis

EMF	- Ellen MacArthur Foundation
EPMS	- Environmental Performance Strategy Map
EXA	- Exergy Analysis
ICV	- Análise de Inventário do Ciclo de Vida
LCA	- Life Cycle Assessment
MCI	- Material Circularity Indicator
MDIC	- Ministério do Desenvolvimento Indústria e Comércio Exterior
MFA	- Material Flow Analysis
MIPS	- Material Inputs per Unit of Service
PNRS	- Política Nacional de Resíduos Sólidos
PSF	- Painel Solar Fotovoltaico
SEPI	- Strategy Environmental Performance Indicator
SFA	- Substance Flow Analysis
WF	- Water Footprint
WBCSD	- World Business Council of Sustainable Development

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVO GERAL.....	22
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
1.3	JUSTIFICATIVA.....	23
1.4	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO.....	25
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	26
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	28
2.1	ECONOMIA CIRCULAR (EC) E MODELOS	28
2.1.1	Modelo Ellen MacArthur Foundation.....	32
2.1.2	Modelo proposto pela <i>Boston Consulting Group</i> e WBCSD	36
2.1.3	Modelo de Economia Circular proposto pela Comissão Europeia	39
2.2	FERRAMENTAS DE AVALIAÇÃO DE CIRCULARIDADE	40
2.3	AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV)	48
2.3.1	Definição de Objetivo e Escopo.....	49
2.3.2	Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV).....	50
2.3.3	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV).....	52
2.3.4	Interpretação	53
2.3.5	Fronteiras da ACV	53
2.4	PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO.....	54
2.4.1	Gerações de Painéis Solares Fotovoltaicos	55
2.4.2	Setor Solar Fotovoltaico no Brasil.....	58
2.4.3	Reciclagem de Painéis Solares Fotovoltaicos	60
2.4.4	Projeto CABRISS.....	60
3	METODOLOGIA.....	64
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	64

3.2	PROTOCOLO DA RSL.....	65
3.3	ETAPAS METODOLÓGICAS.....	68
3.3.1	Buscar ferramentas de avaliação de circularidade de produtos	69
3.3.2	Identificar critérios e selecionar ferramentas mais robustas	69
3.3.3	Aplicar as ferramentas de circularidade no PSF selecionado.....	70
3.3.4	Aplicar ACV para o PSF	71
3.3.5	Discussão comparativa entre EC e ACV	73
4	ANÁLISE E SELEÇÃO DE FERRAMENTAS DE AVALIAÇÃO DE EC.....	74
4.1	ANÁLISE COMPARATIVA DAS FERRAMENTAS ANALÍTICAS DE CIRCULARIDADE.....	74
4.1.1	Circular Economy Toolkit (CET)	77
4.1.2	Circular Economy Indicator Prototype (CEIP).....	83
4.1.3	Índice de Circularidade Material ou <i>Material Circularity Indicator</i> (MCI)	86
5	APLICAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE EC NO OBJETO DE ESTUDO....	95
5.1	APLICAÇÃO DA FERRAMENTA CET NO OBJETO DE ESTUDO	97
5.2	APLICAÇÃO DA FERRAMENTA CEIP NO OBJETO DE ESTUDO.....	101
5.3	APLICAÇÃO DA FERRAMENTA MCI NO OBJETO DE ESTUDO.....	104
5.4	ANÁLISE COMPARATIVA DAS FERRAMENTAS CET, CEIP E MCI.....	109
6	ACV SIMPLIFICADA DO PSF	112
6.1	DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E DO ESCOPO	112
6.2	ANÁLISE DO INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA	114
6.3	AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE CICLO DE VIDA.....	120
7	REFLEXÕES SOBRE A COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS FERRAMENTAS ANALÍTICAS DE CIRCULARIDADE E A ACV PARA O PSF ...	133
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	137
	REFERÊNCIAS.....	140

1. INTRODUÇÃO

No modelo tradicional de produção, recursos naturais são extraídos da natureza e, por meio de processos produtivos, tais recursos são transformados em produtos que serão disponibilizados aos seus consumidores finais. Uma vez finalizada a etapa de consumo, ocorre a conversão automática do que restou dos produtos em resíduos os quais, neste modelo linear, são considerados como passivos ambientais, resultando em consequências negativas que ameaçam os ecossistemas naturais essenciais para a humanidade. Como contraponto a esse modelo não sustentável ditado pela sequência extração-produção-consumo-descarte de recursos, surgiu a Economia Circular (EC) com a proposta de promover o equilíbrio entre o ciclo biológico da natureza e o ciclo técnico ditado pela indústria de transformação. Um dos pilares da EC baseia-se na compreensão de que resíduos são matérias-primas que, embora sejam de segunda mão, apresentam considerável valor agregado sobretudo num contexto global de escassez de recursos, de busca constante por otimização de processos, de maior eficácia organizacional e de pressões sociais por um desenvolvimento mais sustentável (NAUSTDALSLID, 2014; GHISELINNI *et al.*, 2015).

No ano de 2010, a Ellen MacArthur Foundation (EMF) apresentou a definição para o termo Economia Circular como sendo uma economia restaurativa e regenerativa por princípio e que tem como meta prolongar pelo maior tempo possível o valor e o tempo de vida útil de produtos, componentes e materiais (EMF 2015; BOCKEN *et al.*, 2017). Uma característica relevante da definição proposta pela EMF diz respeito a diferenciação entre os chamados ciclos biológicos e técnicos. No ciclo biológico, materiais não tóxicos retornam à biosfera como um ciclo de renovação da natureza, reconstituindo assim seu capital natural próprio, mantendo um equilíbrio de massa e energia entre o que a natureza fornece e depois absorve novamente. Já no ciclo técnico isso ocorre não naturalmente. Para garantir o prolongamento máximo da vida útil dos bens resultantes da indústria é imprescindível a participação humana ativa através de ações intencionais (reparos, manutenções, reusos, reutilizações, remanufaturas, reformas e reciclagens de produtos e de seus componentes) (EMF, 2015).

O poder público, a comunidade acadêmica, os consumidores e as empresas apresentam-se como os atores mais interessados em estudar e promover a EC. Do

ponto de vista empresarial, as consultorias Accenture, Deloitte, EY e McKinsey & Company vêm divulgando continuamente estudos de caso com a aplicação prática da Economia Circular em seus clientes (KIRCHERR *et al.*, 2017). Do ponto de vista governamental, países como China, Japão, Reino Unido, França, Canadá, Suécia e Finlândia são os grandes difusores deste conceito (KORHONEN *et al.*, 2017). Seguindo na mesma direção, em janeiro de 2017, a Comissão Europeia publicou o documento “The Role of Waste-to-Energy in the Circular Economy” cujo conteúdo apresenta o plano de ação europeu para realizar a transição da economia linear para uma mais circular. Segundo o documento, para atingir tal objetivo é necessário rever todas as etapas que compõem o ciclo de vida de um produto, ou seja, desde a sua produção até a definição de destinos que receberão seus resíduos (e que os transformarão em matérias-primas para novos produtos). Assim, a gestão de resíduos assume uma posição fundamental para o sucesso da Economia Circular ao propor a gestão estratégica de resíduos, iniciando na sua prevenção e tentativa de redução até chegar na reutilização, no reuso e na reciclagem.

Num primeiro momento as pesquisas sobre EC focaram em apresentar definições e conceitos em busca de um consenso capaz de descrevê-la em uma definição singular, surgindo assim trabalhos como o de Kirchherr *et al.* (2017) com a apresentação de 114 conceitos distintos de EC. Também surgiram pesquisas apresentando modelos genéricos que representassem a EC, da forma como Elia *et al.* (2017) propõe em seu estudo. Ao mesmo tempo, autores como EASAC (2015) e Bocken *et al.* (2017) identificaram a dificuldade das empresas em mensurar o grau de circularidade de seus negócios e que a ausência de indicadores, a falta de conscientização sobre alternativas circulares e seus benefícios econômicos, aliada a falta de programas educacionais sobre EC para profissionais se traduzem nas grandes barreiras na transição da economia linear para a EC. Enxergando essa lacuna, Pauliuk (2018) e Saidani *et al.* (2019) apresentam estudos distintos em que compilam ferramentas de avaliação de circularidade embasadas em indicadores de circularidade, as quais já apresentados por outros pesquisadores.

Em seu estudo, Brenner e Adamovic (2017) apresentam os objetivos, a metodologia, as empresas e instituições envolvidas na implementação da economia circular para um produto específico: painéis solares fotovoltaicos (PSFs). Nele, os autores argumentam que a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), definida pelas normas

ABNT ISO 14.040 e 14.044, é a técnica de avaliação mais reconhecido internacionalmente para comparar os impactos ambientais de diferentes processos e tecnologias de produção. O mérito da ferramenta decorre da sua capacidade de analisar todas as entradas e saídas de materiais e energia; de apresentar os impactos ambientais associados à função de um produto com abordagem “do berço ao túmulo” e de mostrar os resultados segmentados por categorias de impacto ambiental (como o potencial de aquecimento global relativo à emissão de gases de efeito estufa, ou ainda o potencial de eutrofização relacionado à poluição da água por fosfatos e nitratos).

Para a comunidade europeia (Comissão Europeia, 2015), avaliar o ciclo de vida dos produtos é uma preocupação compartilhada pela sociedade, pelo poder público e pelas empresas privadas, ainda que isso ocorra em função da opinião popular e por meio alterações na legislação. No Brasil, o ciclo de vida dos produtos recebeu atenção especial do legislador durante a elaboração da PNRS, prova disso é a frequência com que o assunto é abordado no referido dispositivo legal. O artigo 3º, Inciso IV, traz a definição de ciclo de vida de produto como sendo “série de etapas que envolvem o desenvolvimento do produto, a obtenção de matérias-primas e insumos, o processo produtivo, o consumo e a disposição final”. O artigo 6º, Inciso VII, estabelece a “responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos” como um dos princípios da PNRS. Tal responsabilidade é explicada no artigo 3º, Inciso XVII, como o “conjunto de atribuições individualizadas e encadeadas dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, dos consumidores e dos titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, para minimizar o volume de resíduos sólidos e rejeitos gerados, bem como para reduzir os impactos causados à saúde humana e à qualidade ambiental decorrentes do ciclo de vida dos produtos”. Já o artigo 7º, Inciso XIII, estabelece com um dos objetivos da PNRS o estímulo à implementação da avaliação do ciclo de vida do produto.

Segundo o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC), a geração de energia elétrica por meio da energia solar fotovoltaica é uma das que mais tem se popularizado em todo o planeta, isso em função de dois motivos principais:

1. Redução acentuada nos custos da energia solar e de seus equipamentos, sobretudo módulos fotovoltaicos;
2. Incentivos governamentais difundidos pelos países para adoção de fontes renováveis de energia.

Além dos benefícios ambientais, como redução das emissões atmosféricas e da poluição, essa fonte renovável de energia traz consigo benefícios econômicos (investimentos em setores diversificados com impacto na indústria, no comércio e nos serviços) bem como benefícios sociais (o incentivo a qualificação e a geração de renda e empregos) (ANEEL, 2017).

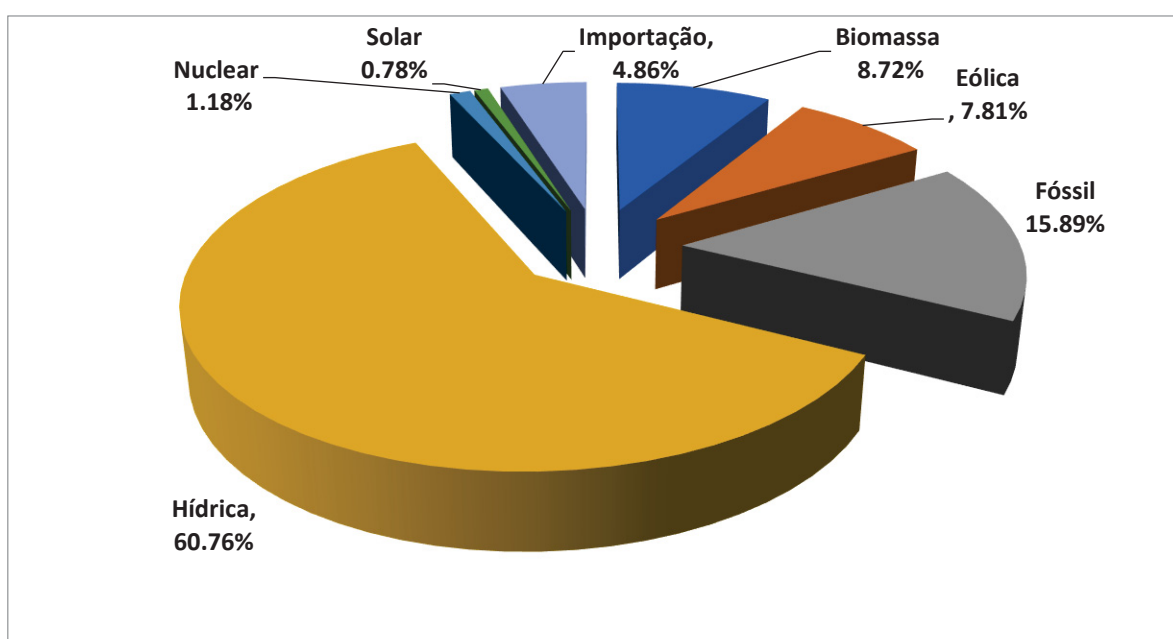
Na visão do MDIC, o Brasil apresenta potencial para ser um dos maiores geradores de energia fotovoltaica do mundo, com expectativa de figurar como um dos 10 maiores mercados mundiais nos próximos anos. Tendo consciência de que a matriz elétrica brasileira ainda se encontra altamente dependente da fonte hidrelétrica, o governo brasileiro vem desenvolvendo programas e ações com o intuito de ampliar a participação de outras fontes renováveis na sua matriz, notadamente as fontes eólicas e solares fotovoltaicas.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE), empresa pública federal que realiza pesquisas com o intuito de fornecer subsídios para o planejamento do setor energético, projeta um crescimento médio no consumo de eletricidade de 3,2% ano para o período de 2017 a 2026, sobretudo nas questões relacionadas a: eficiência energética; fontes renováveis de energia; o petróleo, gás natural e seus derivados; carvão mineral. Para tanto, o estudo considerou como premissas: o cenário demográfico, o cenário macroeconômico para o ano de 2016, a autoprodução de energia, a eficiência na produção energética e os grandes consumidores industriais (EPE, 2017). Das premissas consideradas, destaca-se a autoprodução de energia, a qual consiste na geração de eletricidade em unidades de consumo localizadas nas próprias instalações do consumidor. Ademais, por meio da edição da Resolução Normativa 482/2012 pela ANEEL, e sua posterior atualização em 2015, o governo brasileiro regulamentou a perspectiva de se negociar e distribuir a energia gerada por biogás e por painéis solares fotovoltaicos (EPE, 2017; INPE, 2017).

Em nosso país, a energia elétrica de origem solar corresponde a apenas 0,78% da matriz elétrica brasileira, de acordo com os dados disponíveis no banco de

informações da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para o mês de julho de 2018, como mostra o gráfico 1. Assim, para o Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais (INPE), tendo como foco o desenvolvimento sustentável, a inovação, o desenvolvimento de tecnologias de conversão e de utilização dos recursos energéticos naturais, fica claro o quanto a energia solar apresenta grande potencial de expansão em nosso país.

GRÁFICO 1 - MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA EM JULHO DE 2018 DE ACORDO COM DADOS DISPONÍVEIS NO BANCO DE INFORMAÇÕES DE GERAÇÃO DA AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA



FONTE: Adaptado de ANEEL (2018)

O ano de 2017 foi um ano histórico para o mercado mundial de energia solar fotovoltaica a qual seguem em crescimento exponencial. O avanço tecnológico, a competitividade no setor e a consequente redução dos custos de instalação motivaram os países que mais investem nessa fonte de energia a desembolarem cerca de US\$160,8 bilhões. Por conta desse volume de investimento, do total de potência mundial gerada por meio da energia solar, cerca de 25% foram gerados apenas em 2017 (ABSOLAR 2018; Agência Internacional de Energia, 2018).

Num cenário brasileiro em que a matriz solar encontra-se em plena expansão, um contraponto de relativa relevância diz respeito à destinação final dos resíduos associados à essa matriz energética. Para Brenner e Abramovic (2017), o crescimento

dos resíduos associados a PSFs cria tanto desafios ambientais quanto oportunidades de geração de valor e de novos caminhos para a economia. Oliveira *et al.* (2017) aponta para a necessidade de se planejar a gestão desses novos resíduos e a criação de políticas públicas que minimizem eventuais problemas decorrentes do descarte inadequado PSFs, sobretudo devido a presença de componentes tóxicos em sua composição como chumbo e cádmio ou nobres como a prata. Para IRENA (2016), além dos metais citados, painéis solares podem apresentar em sua composição vidro, cobre, silício, telúrio, estanho, zinco, alumínio, polímeros. A proporção desses componentes fica condicionada à geração ao qual o painel solar está enquadrado. De acordo com Ely e Swart (2014), Dias (2015) e Brenner e Abramovic (2017), existem atualmente no mercado 3 gerações com tecnologias distintas de PSFs. Destes, cerca de 85% apresentam tecnologia de primeira geração e em função de sua maior presença no mercado, correspondem atualmente à aproximadamente 90% do total de resíduos provenientes de painéis solares fotovoltaicos.

De acordo com Fthenakis (2000), Latunussa *et al.* (2016) e Brenner e Abramovic (2017), a reciclagem de painéis solares não é uma tarefa simples em função de seus componentes serem formados por materiais diversos. No entanto, os autores afirmam ser possível reutilizar cerca de 90% de seus materiais em novos módulos solares. O tema ganha mais relevância quando autores como Bogacka *et al.* (2017) e Vellini *et al.* (2017) afirmam que, nos últimos anos, os sistemas fotovoltaicos vêm se propagando cada vez mais em todo o mundo e sobretudo na Europa, onde as previsões preparadas para o continente mostram que nos próximos 20 anos os resíduos resultantes de células fotovoltaicas podem chegar a 3 milhões de toneladas por ano.

Conscientes do impacto ambiental resultante dos resíduos provenientes da disposição final de painéis solares fotovoltaicos na Europa, desde o ano de 2015 uma iniciativa conjunta formada por 16 empresas e institutos de pesquisa europeus atua nesta questão, denominada projeto CABRISS – Implementação da Economia Circular na Indústria Fotovoltaica com base na Reciclagem, no Reuso e na Recuperação dos elementos químicos Índio, Silício e Prata. Apesar de o projeto inicialmente prever seu foco na indústria fotovoltaica, os desdobramentos para as indústrias de vidro e de componentes eletrônicos também compõem o estudo de forma considerável, tendo

em vista que desenvolver a Simbiose Industrial com estes segmentos industriais é também um dos objetivos desse projeto.

O projeto CABRISS está inserido no contexto da Economia Circular onde, segundo a Comissão Europeia (2016) e Brenner e Abramovic (2017), o valor dos produtos e dos materiais é prolongado pelo maior tempo possível. Para que isso ocorra, os resíduos e os recursos devem ser minimizados, e quando um produto atingir o final de sua vida útil, seus componentes devem ser reinseridos no ciclo técnico de outros produtos de forma que continuem a criar valor, resultando em consequências positivas para o meio ambiente e benefícios econômicos para o mercado por meio da inovação e geração de empregos.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta Dissertação consistiu em avaliar a circularidade do painel solar fotovoltaico de silício cristalino de 1ª geração, por meio de ferramentas de economia circular, e mensurar o desempenho ambiental, por meio da técnica ACV.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir tal objetivo, foi necessário estabelecer alguns objetivos específicos, os quais foram:

- Comparar as ferramentas e selecionar as mais abrangentes (que apresentem mais parâmetros) para aplicar no objeto de estudo;
- Mensurar o grau de circularidade dos PSFs no Brasil por meio de ferramentas de circularidade escolhidas na etapa anterior;
- Avaliar o impacto ambiental potencial do PSF de silício cristalino por meio da metodologia ACV;
- Analisar a integração das ferramentas para a avaliação de circularidade.

1.3 JUSTIFICATIVA

A principal contribuição desta pesquisa consiste em conciliar 3 assuntos de relativa relevância para o momento atual: economia circular, painel solar fotovoltaico e ACV.

Nos últimos anos, a EC tem sido largamente estudada em função de seu potencial em propor uma alternativa ao problemático modelo linear de produção e consumo. No entanto, até o ano de 2017, de acordo com Oliveira *et al.* (2017), o mesmo não podia ser afirmado para o Brasil. Em sua pesquisa o autor afirmava que até maio de 2017 apenas 5 artigos científicos brasileiros haviam sido publicados sobre o assunto, sendo 1 em 2016 e 4 no ano de 2017. Atualmente, tal afirmação não encontra mais fundamento.

Do ponto de vista governamental, no ano de 2018, o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), em parceria com a as Organizações das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável (UNIDO), lançou um projeto intitulado “Mapa do Caminho para a Economia Circular no Brasil” com a intenção de encontrar as iniciativas já existentes e mapear novas oportunidades e desafios para a implementação de um modelo de economia circular no Brasil (MCTIC, 2018). Ainda no ano de 2019, e representando o ponto de vista empresarial, a Confederação Nacional da Indústria (CNI) lançou a cartilha “Economia Circular: Oportunidades e Desafios para a Indústria Brasileira” (CNI, 2018). Em setembro de 2019, a mesma CNI atualizou seu estudo anterior ao lançar a cartilha “Economia Circular: Caminho Estratégico para a Indústria Brasileira”. Neste novo estudo a CNI propôs uma estratégia para valorizar os recursos naturais ao mesmo tempo em que pudesse promover a competitividade da indústria nacional (CNI, 2019).

As energias renováveis estão inseridas num contexto de uma sociedade cuja demanda energética cresce exponencialmente, ao mesmo tempo em que cada vez mais os consumidores exigem produtos e serviços sustentáveis do ponto de vista econômico e ambiental. De acordo com Dias (2015), estudos que se apliquem a pesquisar PSFs de silício cristalino na direção da Economia Circular traduzem-se em significativas contribuições ao estudo científico.

Para Sica *et al.* (2018) é fundamental estudar o fim da vida útil dos painéis solares fotovoltaicos sob a ótica da economia circular, uma vez que seus resíduos apresentam potencial de tornarem-se matérias-primas para novos produtos, que seriam destinações mais nobres do que a incineração ou o simples descarte. Segundo seus estudos, seria possível recuperar, de acordo com o material utilizado na confecção dos painéis ao longo de umas três gerações atualmente disponíveis no mercado, as seguintes quantidades:

- 97% do silício (Si) utilizado na forma de vidro (silicato);
- 100% do Alumínio (Al) utilizado;
- 80% dos metais cobre (Cu) e telúrio (Te) utilizados;
- 75% e 99% respectivamente dos metais raros Índio (I) e Gálio (Ga) utilizado.

A recuperação de matérias-primas, a redução da demanda por energia e a diminuição da quantidade de materiais que seriam destinadas a aterros sanitários são benefícios esperados que Vellini *et al.* (2017) apresenta como resultados esperados do processo de reciclagem de painéis solares fotovoltaicos ao final de sua vida útil.

Outro aspecto que merece destaque e que já foi abordado por Dias (2015) diz respeito à classificação dos PSFs de 1ª geração como resíduos sólidos perigosos de Classe I, de acordo com a NBR 10004. Painéis de 1ª geração apresentam em sua composição metais como chumbo, prata, cádmio, cromo e fluoreto. De acordo com o estudo de Dias (2015) apenas o percentual de chumbo encontrado estava acima do limite estipulado pela NBR 10005, fato esse que foi suficiente para classificar o produto da forma prevista pela NBR 10004. Em função dessa classificação, é fundamental estudar a destinação final de PSFs, já que ao final da vida útil aqueles painéis que não forem reciclados ou reutilizados precisarão ter seus resíduos encaminhados a destinos próprios para resíduos industriais considerados perigosos.

Ressalta-se também o ineditismo desta pesquisa em propor uma abordagem para avaliar a circularidade de produtos conciliando ferramentas de avaliação de circularidade com a metodologia ACV. Na visão de Longo *et al.* (2020), a ACV é uma das metodologias mais padronizadas de avaliação de desempenho ambiental, capaz de avaliar o uso de recursos, energia e encargos ambientais relacionados a todo o ciclo de vida de produtos e serviços. Sua versatilidade e robustez faz com que a ACV

seja para Choi *et al.* (2012) a técnica mais completa de avaliação de desempenho ambiental.

No que diz respeito às pesquisas nacionais desenvolvidas sobre PSFs e sistemas fotovoltaicos, nota-se que elas não alcançam o escopo da Economia Circular e a avaliação do grau circularidade do produto. Dias (2015) fez um estudo sobre a reciclagem de PSFs; Ghizoni (2016) desenvolveu um estudo acerca da logística reversa dos sistemas fotovoltaicos; Oliveira (2017) apresentou uma pesquisa sobre os impactos ambientais PSFs e Oliveira *et al.* (2017) estudou a destinação final dos PSFs em nosso país. Assim, pode-se afirmar que até o presente momento este é o primeiro estudo de caso realizado no cenário brasileiro com a aplicação das ferramentas de circularidade e a metodologia ACV para PSFs de silício cristalino.

Quanto ao desenvolvimento de indicadores para a avaliação da Economia Circular, sobretudo em nível Macro, para Elia *et al.* (2016) este processo ainda se encontra em fase inicial de desenvolvimento. De acordo com e Merli *et al.* (2018) durante este processo de desenvolvimento, metodologias como ACV e Análise de Fluxo de Materiais (MFA) são amplamente usadas para gerar indicadores para avaliar a eficiência dos recursos, a produção sustentável e a circularidade.

1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

O painel solar fotovoltaico de silício cristalino foi definido como o objeto de análise deste estudo. Para Bogacka *et al.* (2017) e Vellini *et al.* (2017), nos últimos anos os sistemas fotovoltaicos vem se propagando cada vez mais em todo o mundo e sobretudo na Europa, as previsões realizadas pela Comissão Europeia para o continente apontam que nos próximos 20 anos o fluxo de células fotovoltaicas pode chegar a 3 milhões de toneladas por ano, estatística essa que comprova a relevância de se estudar estes produtos. Já os estudos realizados por Ely e Stuart (2014), Dias (2015) e Brenner e Abramovic (2017) evidenciam que os painéis solares de 1ª geração correspondem atualmente a cerca de 90% dos resíduos relativos ao total desses produtos. Tais estudos justificaram a escolha deste produto e desta geração de tecnologia como objeto de estudo da pesquisa.

No que diz respeito às ferramentas capazes de avaliar a circularidade de produtos, a partir da revisão sistemática de literatura foram selecionadas 30 ferramentas, as quais foram apresentadas na seção 2.2 do Capítulo 2. Desse total, 3 ferramentas foram selecionadas para serem aplicadas ao objeto de estudo. A comparação das 31 ferramentas, bem como os critérios de avaliação e seleção que resultaram escolha das ferramentas CEIP, MCI e CET foram apresentadas no Capítulo 4. Já os resultados das aplicações das 4 ferramentas selecionadas para o PSF de silício cristalino foram apresentados no Capítulo 5.

Quanto à avaliação dos impactos ambientais potenciais causados pelo objeto de estudo no cenário brasileiro, optou-se pela metodologia ACV, a qual foi apresentada na seção 2.3 do Capítulo 2. A fundamentação pela escolha da ACV como metodologia de avaliação de desempenho ambiental em detrimento de outras ferramentas bem como seu detalhamento foi apresentado no capítulo 3, na seção 3.3.4. A base de dados do inventário de ciclo de vida (ICV) escolhido foi o Ecoinvent (versão 3.5); o método de AICV selecionado foi o IMPACT2002+ (versão 2.14) por ser o mais utilizado para a análise de produtos; o SimaPro 9.0.0, da fabricante holandesa Pre-Consultants foi o software utilizado para a simulação dos resultados da ACV. Os resultados da ACV realizada para o estudo de caso foram apresentados no Capítulo 6. Já as comparações dos resultados da aplicação das ferramentas de circularidade com a ACV foram apresentadas no Capítulo 7.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

CAPÍTULO 1: a Dissertação tem início com a introdução, em que se apresenta a contextualização do tema do trabalho, os objetivos, a justificativa e a delimitação de atuação da pesquisa.

CAPÍTULO 2: aborda a revisão de literatura dos assuntos fundamentais para sustentar a pesquisa. Inicia pelo estudo da Economia Circular e modelos e na sequência apresenta ferramentas analíticas de circularidade, passando então para a ACV e concluindo o capítulo com o tema PSF.

CAPÍTULO 3: apresenta a caracterização da pesquisa, o protocolo da revisão sistemática de literatura e as etapas da metodologia desenvolvidas para alcançar os objetivos propostos.

CAPÍTULO 4: a partir das ferramentas analíticas de circularidade apresentadas no Capítulo 2, este capítulo apresenta uma análise comparativa dessas ferramentas em função dos parâmetros que as constituem. Em seguida, faz-se um detalhamento das ferramentas com maior número de critérios atendidos (CEIP, MCI e CET).

CAPÍTULO 5: apresenta os resultados obtidos pela aplicação das ferramentas CEIP, MCI e CET sobre o objeto de estudo, PSF de silício cristalino. Em seguida, realiza-se uma análise comparativa dos resultados.

CAPÍTULO 6: apresenta o resultado da aplicação da metodologia ACV, exibindo as categorias de impacto, os materiais e os processos mais impactantes.

CAPÍTULO 7: apresenta uma discussão comparativa sobre os resultados encontrados pelas ferramentas analíticas de EC e pela metodologia ACV. Fornece também uma análise de sensibilidade das ferramentas e, por fim, propõe um Fluxo de avaliação de grau de circularidade para produtos.

CAPÍTULO 8: apresenta as considerações finais deste estudo e a perspectiva de continuidade da pesquisa.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este Capítulo objetiva apresentar os principais assuntos de interesse para o entendimento desta dissertação. Para isso, são apresentados os assuntos Economia Circular (EC) e Modelos (2.1), Ferramentas de Avaliação de Circularidade (2.2), Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (2.3) e Painel Solar Fotovoltaico (PSF) (2.4).

2.1 ECONOMIA CIRCULAR (EC) E MODELOS

“Uma economia circular é restaurativa e regenerativa por princípio. Seu objetivo é manter produtos, componentes e materiais em seu mais alto nível de utilidade e valor o tempo todo, distinguindo entre ciclos técnicos e biológicos. Esse novo modelo econômico busca, em última instância, dissociar o desenvolvimento econômico global do consumo de recursos finitos.” (EMF, 2015).

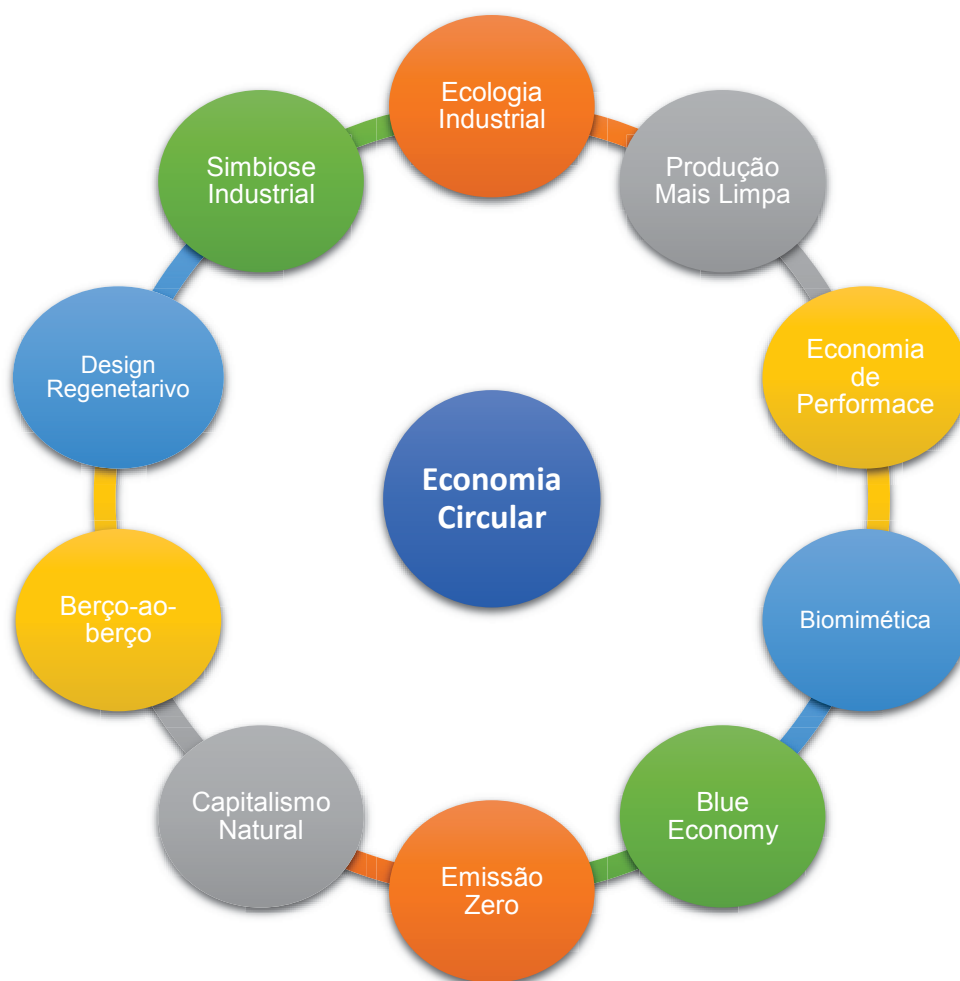
O contínuo crescimento da população global e, sobretudo o movimento mundial de ascensão da população de classes inferiores à classe-média, resultou em uma situação que com o passar dos anos tende a tornar-se ainda mais crítica: a demanda desenfreada por *commodities* e outros recursos naturais (EMF, 2015; WBCSD e BCG, 2018).

A Economia Circular é a evolução do tradicional modelo econômico linear da economia global. No antigo modelo, matérias-primas in natura são extraídas da natureza para então serem transformadas em processos industriais, e que após concluírem a etapa de consumo, são descartadas na forma de resíduos. A consequência há altos índices de geração de resíduos e a contínua extração de recursos naturais, isso tudo num contexto em que tais recursos são finitos (WBCSD e Accenture *Strategy*, 2015). Nesse modelo, o consumo assume o protagonismo, não havendo preocupação com o retorno dos recursos à cadeia de valor gerando consequências negativas como: perdas econômicas, desperdício estrutural, riscos de preços, riscos de ofertas, degradação dos sistemas naturais, tendências regulatórias (EMF, 2015).

Como contraponto ao modelo tradicional, a EC surgiu como um modelo industrial e econômico que combina ideias e definições presentes em outros estudos

científicos, como: ecologia industrial, ecossistema industrial, simbiose industrial, produção mais limpa, sistema produto-serviço, economia de serviços (economia de desempenho), eco-eficiência, design do berço-ao-berço, biomimética, performance econômica, emissão zero, abordagem de sistemas do *Blue Economy*, sistemas de manufatura com fluxo de desenvolvimento e materiais com circularidade e o capitalismo natural, como ilustra a FIGURA 1 (EMF, 2015; KORHONON *et al.*, 2017). Assim, a EC propõe prolongar o quanto for possível a vida útil de recursos naturais, materiais, peças e produtos, resultando em um sistema de longa vida que se sustenta na redução de extração dos recursos da natureza, na reciclagem, na reutilização, na reforma e na remanufatura (WBCSD e Accenture Strategy, 2015). Na visão da Deloitte (2015) a EC não se limita à prevenção da geração e redução dos resíduos, e sim as utiliza para inspirar inovações tecnológicas, organizacionais e sociais dentro das cadeias de valor.

FIGURA 1 - CONCEITOS QUE SUSTENTAM A ECONOMIA CIRCULAR



FONTE: Adaptado em EMF (2015) e KORHONON *et al.* (2017).

O resultado da revisão de literatura identificou estudos precursores, por parte de pesquisadores, de instituídos de pesquisas, empresas privadas e da Comissão Europeia, que buscaram definir o conceito de economia circular. O QUADRO 1 apresenta tais definições:

QUADRO 1 - DEFINIÇÕES DE ECONOMIA CIRCULAR

Autor	Definição de Economia Circular
Korhonen et al (2018, p.551)	A Economia Circular, como um conceito essencialmente contestado, não se caracteriza como uma teoria, e sim como uma abordagem emergente sobre a produção e o consumo industrial.
Prieto-Sandoval et al (2018, p.613)	Um sistema econômico que representa uma mudança de paradigma no que diz respeito da relação da humanidade com a natureza. Tem como objetivo impedir a exaustão dos recursos naturais, o fechamento dos ciclos de energia e de materiais e propiciar o desenvolvimento sustentável em níveis micro (empresas e consumidores), meso (agentes econômicos integrados) e macro (cidades, regiões e governos).
Geissdoerfer et al (2017, p.766)	Um sistema regenerativo cuja entrada de recursos, resíduos, emissões e perdas de energia são minimizados pela desaceleração, pelo estreitamento e pelo fechamento dos ciclos de materiais e energia
Kirchherr et al (2017, p.229)	O sistema econômico que substitui o conceito de "fim de vida" por reutilização, reutilização alternativa, reciclagem e recuperação dos materiais provenientes da produção, distribuição ou consumo.
Ghisellini et al (2016, p.24)	A Economia Circular apresenta-se como um modelo alternativo à economia neoclássica, do ponto de vista teórico e prático, sendo capaz de reconhecer o papel do meio ambiente, suas funções e suas interações com o sistema econômico.
WBCSD e The Boston Consulting Group (2018, p.8)	É uma nova maneira de olhar para a relação entre os recursos naturais, consumidores e mercados. A EC rompe com o modelo econômico tradicional de "extrair-produzir-descartar" para um modelo de design regenerativo, que permite estender a vida de recursos, componentes e produtos por meio do reuso, do condicionamento, da remanufatura e da reciclagem.
Ellen MacArthur Foundation (2013, p.07)	É um sistema industrial restaurativo e regenerativo por intenção. Substitui o conceito de "fim de vida útil" para a restauração; prega o uso de energias renováveis; elimina o uso de substâncias e produtos químicos (que comprometem a sua reutilização); visa a eliminação da geração de resíduos por meio do design inteligente de materiais, produtos, sistema e modelos de negócios.
Comissão Europeia (2015, p 02)	Na EC, o valor dos produtos, materiais e recursos se mantém na economia o máximo de tempo possível e a produção de resíduos se reduz ao mínimo. Ela é fundamental para desenvolver uma economia sustentável, com redução da emissão de gás carbônico, eficiente no uso de recursos naturais e competitiva.

FONTE: O autor (2019).

Em janeiro de 2017, a Comissão Europeia publicou o documento "*The Role of Waste-to-Energy in the Circular Economy*" cujo conteúdo apresenta o plano de ação europeu para realizar a transição para uma economia mais circular. Segundo o documento, para atingir tal objetivo é necessário rever todas as etapas que compõem o ciclo de vida de um produto, ou seja, desde a sua produção até a definição de destinos que receberão seus resíduos e as transformarão em matérias-primas para

novos produtos. Assim, a gestão de resíduos assume uma posição fundamental para o sucesso da Economia Circular ao gerir de forma estratégica a prevenção, a reutilização e a reciclagem dos resíduos. Os próximos itens, 2.1.1 a 2.1.4, apresentam modelos de implementação da economia circular definidos respectivamente pela: Ellen MacArthur Foundation; The Boston Consulting Group e WBCSD; Comissão Europeia e pelo Projeto CABRISS. Esses institutos foram os precursores do assunto Economia Circular, tendo contribuído para a formação do conceito mais amplamente aceito e referenciado nos estudos sobre Economia Circular (Kirchherr *et al.*, 2017; Saidani *et al.*, 2017; Urbinati *et al.*, 2017).

2.1.1 Modelo Ellen MacArthur Foundation

Fundada no ano de 2010 e mantida por um grupo de parceiros – B&Q, BR, Cisco, National Grid e Renault – a EMF foi criada com o objetivo de “inspirar uma geração a repensar, redesenhar e construir um futuro positivo” (EMF, 2013).

No ano de 2013, a empresa de consultoria McKinsey & Company estruturou o projeto cujas análises subsidiaram a Ellen MacArthur Foundation na criação da cartilha “*Towards the Circular Economy – Volume 1*”. Segundo Geissdoerfer *et al.* (2016), esse documento tornou-se o grande guia de conhecimento a respeito da Economia Circular, pois apresentou a mais difundida definição de Economia Circular; seus princípios norteadores; os conceitos Ciclo Técnico e Ciclo Biológico e as 4 fontes ou poderes de criação de valor na EC.

De acordo com EMF (2015), a Economia Circular é pautada em 3 princípios:

- I. “Preservar e aprimorar o capital natural controlando estoques finitos e equilibrando os fluxos de recursos renováveis”;
- II. “Otimizar o rendimento de recursos fazendo circular produtos, componentes e materiais no mais alto nível de utilidade o tempo todo, tanto no ciclo técnico quanto no biológico”;
- III. “Estimular a efetividade do sistema revelando e excluindo as externalidades negativas desde o princípio”.

O primeiro princípio preconiza a entrega virtual como sendo a ideal sempre que possível, tendendo a desmaterializar produtos e serviços. Tecnologias e processos

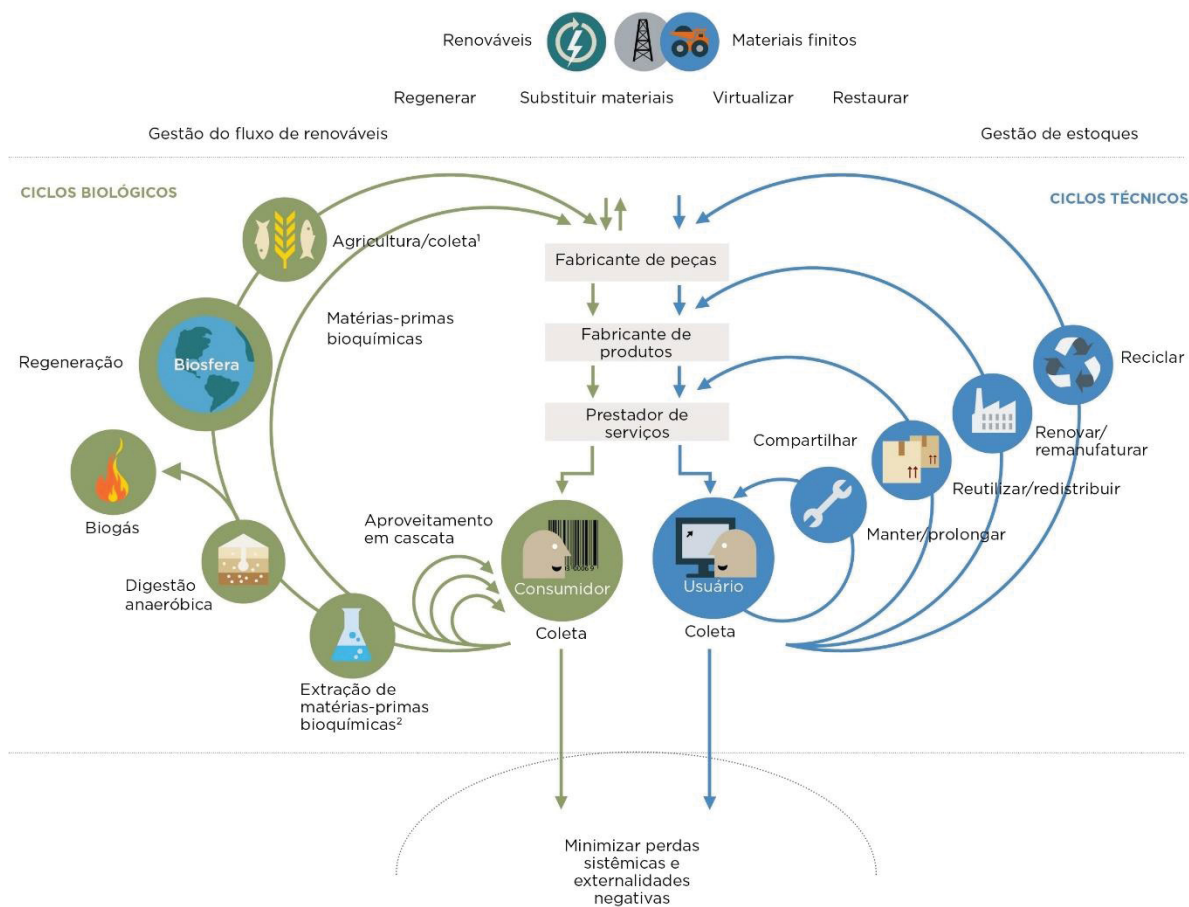
que utilizem recursos renováveis e que busquem um melhor desempenho no uso de recursos naturais fazem parte do sistema circular. Além disso, o capital natural é aperfeiçoado, o que propicia o fluxo de nutrientes dentro do sistema e cria condições para regeneração do solo, por exemplo, e de outros recursos naturais (EMF, 2015; TIOSSI *et al.*, 2017).

De acordo com o segundo princípio, deve-se projetar visando a remanufatura, a renovação e a reciclagem. Sistemas circulares apresentam menores circuitos internos, o que preserva a energia presente nos materiais e nos componentes, prolonga a vida útil do produto e favorece sua reutilização. Também estimula, por meio da decomposição, a reinserção de nutrientes biológicos na biosfera, isso porque os materiais biológicos ao serem consumidos e metabolizados podem gerar novos valores na economia, o que consiste na essência da criação de valor.

O terceiro princípio diz respeito à ausência de externalidades negativas na EC, já que desde a concepção dos projetos, as “perdas são excluídas” (EMF, 2015; TIOSSI *et al.*, 2017).

As definições da economia circular e os seus princípios estão representados graficamente na FIGURA 2 pelo Diagrama de Borboleta da Economia Circular proposto pela Fundação Ellen MacArthur:

FIGURA 2 - DIAGRAMA DE BORBOLETA DA EC



FONTE: EMF (2015).

Tanto a metodologia *Cradle to Cradle* (C2C) quanto a Economia Circular distinguem os ciclos dos nutrientes dos ciclos técnicos e biológicos. Suas definições estão explícitas no QUADRO 2.

QUADRO 2 - CICLO TÉCNICO X CICLO BIOLÓGICO

Ciclo Técnico	Ciclo Biológico
<ul style="list-style-type: none"> - Gestão dos estoques dos materiais finitos; - Uso substitui o consumo; - Materiais técnicos: recuperados e restaurados no ciclo técnico(maior parte) 	<ul style="list-style-type: none"> - Fluxo de materiais renováveis; - Consumo: só no ciclo biológico; - Nutrientes biológicos: regenerados no ciclo biológico (maior parte).

FONTE: Adaptado em EMF (2015).

Além dos princípios mencionados, a Economia Circular apresenta algumas características fundamentais.

- 1ª Característica: As perdas são “excluídas desde o princípio”. Não há resíduos. Os materiais biológicos retornam ao solo facilmente, pois não são tóxicos e os materiais técnicos, são projetados para sempre recuperados e reutilizados.
- 2ª Característica: A diversidade e a biodiversidade são fatores presentes que conferem versatilidade e resiliência em sistemas vivos.
- 3ª Característica: As fontes de energia precisam ser renováveis, visando tornar os sistemas mais resilientes e contendo a dependência de recursos.
- 4ª Característica: O pensamento sistêmico é a base de tudo, já que empresas, pessoas ou plantas estão fortemente conectadas num ambiente composto por sistemas complexos. Como consequência, os preços dos produtos devem traduzir de forma real todos os para serem efetivos e representativos da realidade (EMF, 2015).

Com base nesses princípios, a Economia Circular proporciona quatro fontes ou poderes de criação de valor, os quais são:

- O poder dos círculos menores: Quanto mais interno é o círculo, mais valiosa é a estratégia. Reparar e manter um produto preserva a maior parte de seu valor;
- O poder dos círculos mais longos: Significa maximizar o número de ciclos ou o tempo de cada ciclo de cada produto, ou seja, reutilizar o mesmo produto várias vezes;
- O poder do uso em cascata: Diz respeito à diversificação do reuso por toda a cadeia de valor;
- O poder dos insumos puros: O fluxo de matérias não contaminadas aumenta a eficiência da coleta, mantém a qualidade, incrementa longevidade e aumenta a produtividade do material.

Lewandowski (2016) diz que modelos de negócios circulares podem derivar dos principais princípios que norteiam a EC e como exemplo, o autor cita a estrutura

“ReSOLVE”. Ela foi desenvolvida pelos pesquisadores da EMF (2015) como sendo um conjunto de ações que governos e empresas podem adotar para efetuar a transição do modelo linear para o modelo circular. Além do mais, trata-se de uma ferramenta com iniciativas voltadas para o crescimento e de geração de estratégias circulares. O QUADRO 3 apresenta as 6 ações da estrutura “ReSOLVE”:

QUADRO 3 - ESTRUTURA "RESOLVE"

Regenerar (RE generate)	Mudar para energia e materiais renováveis Recuperar, reter e restaurar a saúde dos ecossistemas Recuperar e devolver recursos biológicos à biosfera
Compartilhar (S hare)	Compartilhar bens como automóveis, salas e eletrodomésticos Reutilizar produtos Usar produtos de segunda mão Prolongar a vida útil dos produtos com manutenções Projetar com foco na durabilidade Projetar visando a contínua atualização
Otimizar (O ptimise)	Criar produtos mais eficientes Melhorar o desempenho dos produtos Remover resíduos na produção Remover resíduos na cadeia de suprimentos Impulsionar big data, automação e o sensoriamento remoto
Ciclar (L oop)	Reciclar materiais Remanufaturar produtos Remanufaturar componentes Fazer uso da digestão anaeróbia Remover dos resíduos orgânicos as substâncias bioquímicas
Virtualizar (V irtualize)	Utilizar aplicativos no celular ao invés de bens materiais (Ex: Despertador) Realizar compras online Substituir livros físicos por e-readers
Trocar (E xchange)	Aderir a novos produtos e serviços Usar novas tecnologias Substituir materiais não renováveis por novos mais inteligentes

FONTE: Adaptado em EMF (2015).

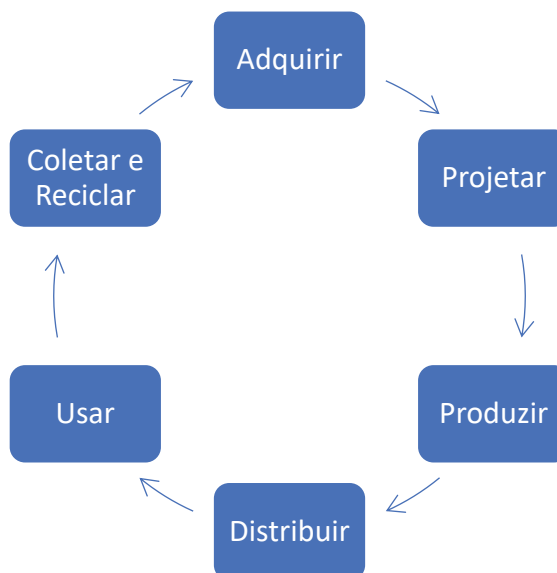
2.1.2 Modelo proposto pela *Boston Consulting Group* e WBCSD

O modelo de Economia Circular desenvolvido pela *Boston Consulting Group* em parceria com o WBCSD estabelece que existem 3 tipos de inovações circulares

cujos graus de complexidade são progressivos e que para serem corretamente aplicados, devem seguir rigorosamente as etapas estabelecidas. Quando as 3 soluções são implementadas em conjunto, todos os aspectos do ciclo de valor são atingidos.

O ciclo de valor da EC, conforme mostra a FIGURA 3, é composto por seis atividades: A primeira ação adquirir insumos que são provenientes da reciclagem ou que foram regenerados, visando minimizar a extração de recursos da natureza. Em seguida, a segunda ação é projetar produtos que sejam reutilizáveis e recicláveis. A terceira atividade é produzir gerando o mínimo de resíduos e com a máxima eficiência no uso dos recursos. A quarta atividade consiste em alugar, compartilhar ou vender o direito ao uso ou o acesso a um serviço, e não necessariamente comercializar a propriedade de um produto físico. A quinta ação é utilizar produtos com responsabilidade e de forma não excessiva, visando estender sua vida útil e reduzir a poluição. Por fim, a sexta ação consiste em coletar e reciclar o produto ao final de sua vida, promovendo assim o fechamento do ciclo, conforme se vê na FIGURA abaixo (BCG e WBCSD, 2018).

FIGURA 3 - ATIVIDADES DA ECONOMIA CIRCULAR AO LONGO DO CICLO DE VALOR



FONTE: Adaptado de BCG e WBCSD (2018).

Tipos de Economia Circular, segundo BCG e WBCSD (2018):

- a) Inovação no processo: O primeiro estágio para a transição do modelo linear para o modelo circular tem início com a inovação em processos. Processos se relacionam com áreas operacionais, onde os funcionários agem diretamente.
- b) Inovação no produto: Um estágio mais adiantado e mais desafiador que o anterior. Exige modificações nas aquisições, no desenvolvimento dos produtos, na forma de uso prevista para os consumidores e na forma de coleta e reciclagem a ser realizada pela empresa. Exige também que seus colaboradores internos sejam capacitados para criarem e aperfeiçoarem os produtos sobre a ótica da Economia Circular.
- c) Inovação no Modelo Econômico: O terceiro e mais desafiador estágio exige que a empresa reflita na forma como o produto é comercializado para seu consumidor. Para estar alinhado com a Economia Circular, as empresas precisam educar seus consumidores sobre como melhor utilizarem seus produtos, de forma que possam prolongar sua vida útil (BCG e WBCSD, 2018).

Por fim, foram identificados 10 fatores comuns de sucesso e melhores práticas que cada empresa deve ter em mente ao iniciar, implementar e comercializar soluções circulares para seus clientes:

- 1) Envolvimento com os *Stakeholders*;
- 2) Comprometimento e suporte da alta direção;
- 3) Definir e divulgar internamente o conceito de “Circularidade”;
- 4) Estabelecer metas específicas e desenvolver um estudo de caso;
- 5) Capacitar seus colaboradores internos;
- 6) Envolver e capacitar grupos de trabalho;
- 7) Iniciar a inovação pelo processo, depois para o produto e por fim, ao modelo econômico;
- 8) Envolver e cooperar com colaboradores externos;
- 9) Definir Indicadores para mensurar avanços em sustentabilidade, competitividade e lucratividade.
- 10) Divulgar as melhores práticas.

2.1.3 Modelo de Economia Circular proposto pela Comissão Europeia

Em dezembro de 2015, a Comissão Europeia divulgou um Plano de Ação visando promover a Economia Circular por toda Europa por meio do documento intitulado “Fechar o ciclo – Plano de Ação da EU para a economia circular”.

Do ponto de vista dos consumidores, a Comissão Europeia quer:

- Estimular o reuso e o reparo de produtos, revisando legislações sobre o descarte de produtos;
- Direcionar o Ecodesign em busca de produtos que utilizem menos energia e que favoreça a reparabilidade, a durabilidade, a reciclabilidade e o contínuo aprimoramento;
- Auxiliar na aceitação de contratos públicos orientados para a economia circular;
- Por meio da rotulação ecológica e agindo sobre causos de obsolescência programada, a Comissão Europeia fornecer aos consumidores instrumentos confiáveis de avaliação de impactos ambientais causados pelos produtos consumidos (CE, 2015b).

No que diz respeito à fase de produção, a Comissão Europeia quer fornecer instrumentos e incentivos que auxiliem na economia de recursos e que impulsionem a inovação e cooperação tecnológica por meio de: projetos de produtos melhores; criação de incentivos econômicos para produtores; melhorias nos processos produtivos e com processos industriais mais inovadores (CE, 2015c).

A reciclagem é considerada um pré-requisito para a economia circular e, portanto, e com ela, o que antes era visto como resíduo agora torna-se um recurso valioso. Para estimular o uso dessas matérias-primas secundárias, a Comissão Europeia pretende remover barreiras que existam em seu comércio, aprimorar as práticas de gerenciamento de resíduos e garantir altos padrões de qualidade. Assim, as propostas chave da Comissão são:

- Desenvolver padrões de qualidade para matérias-primas secundárias (oriundas da reciclagem);

- Desenvolver regras comuns para fertilizantes, visando estimular a fabricação de fertilizantes orgânicos oriundos de resíduos de alimentos, lodo e esterco;
- Incentivar a reutilização de águas residuais tratadas, com legislação sobre requisitos mínimos para reutilização de água;
- Estimular o design inteligente de materiais plásticos, favorecendo a reciclagem, o menor consumo de materiais in natura, evitando a disposição em aterros e a incineração;
- Promover ciclos menores rastreáveis e com materiais atóxicos;
- Facilitar a circulação de matérias-primas secundárias entre os países (CE, 2015d);

2.2 FERRAMENTAS DE AVALIAÇÃO DE CIRCULARIDADE

Nesta seção, foram consideradas ferramentas de avaliação de circularidade aquelas assim classificadas pelos autores em seus respectivos estudos. Para Ghisellini *et al.* (2016), Linder *et al.* (2017) e Kircherr (2017), o campo de aplicação da Economia Circular apresenta 3 níveis de abrangência: Macro, Meso e Micro, os quais são apresentados no QUADRO 4. Merli *et al.* (2018) aponta que os estudos que buscam mensurar o grau de circularidade apresentam duas linhas de ação. A primeira busca mensurar a circularidade de forma mais ampla, num nível de avaliação administrativo, denominado nível de abrangência “Macro”. A segunda linha de ação visa mensurar a circularidade nos processos circulares, dando origem a outros dois níveis de abrangência denominados “Meso” e “Micro”.

O primeiro (Macro) refere-se a países, regiões e cidades; o segundo (Meso) refere-se a parques industriais, setores industriais e a relação entre as empresas de uma determinada localidade (Simbiose Industrial); já o terceiro nível (Micro) diz respeito a circularidade no contexto das organizações, dos produtos e dos consumidores. Ainda neste assunto, a norma britânica BS 8001:2017 e o autor Pauliuk

(2018) falam sobre indicadores de 3 níveis de abrangência para avaliar a circularidade:

- Nível macro: indicadores medem o impacto socioeconômico da economia circular implementada por países ou cidades;
- Nível meso: avaliar a simbiose entre indústrias e o sistema urbano;
- Nível micro: redução de custos, novas fontes de inovação e receita, melhor relacionamento com os clientes e melhoria da resiliência para organizações.

QUADRO 4 - NÍVEIS DE ABRANGÊNCIA DA EC

MACRO	MESO	MICRO
Continente	Parques Industriais	Organizações
País	Setores	Produtos
Região	Segmentos industriais	Consumidores
Cidade		

FONTE: GHISELLINI *et al.* (2016), LINDER *et al.* (2017), KIRCHERR (2017), PAULIUK (2018); MERLI *et al.* (2018).

Ainda de acordo com Merli *et al.* (2018), cada país apresenta uma estratégia em relação ao desenvolvimento de formas de avaliar a Economia Circular. Desde 2008, a China já possui uma Política Nacional de Economia Circular orientada para o desenvolvimento, planejamento e avaliação de projetos-pilotos de eco cidades e eco-parques, e deixando claro seu perfil de pesquisar estratégias de nível de Macro e Meso. Por outro lado, as pesquisas realizadas por países europeus são orientadas em identificar padrões de circularidade da sociedade, realizando assim pesquisas nos três níveis de abrangência. No nível Macro, os estudos concentram-se em desenvolver e avaliar cidades circulares, a gestão nacional dos resíduos e sua inter-relação com os estados que compõem os países. No nível Meso, os esforços europeus são vistos nas experiências de Simbiose Industrial relatadas sobretudo por pesquisadores italianos, como Elia *et al.* (2017).

Já no nível Micro, definido com foco deste trabalho, as iniciativas concentram-se nas empresas e nos consumidores. Para Ghisellini *et al.* (2016), isso ocorre em função do Plano de Ação Europeu para a EC apresentar uma abordagem de baixo para cima, tendo como objetivo disseminar o conceito e as práticas de

sustentabilidade diretamente na sociedade. Linder *et al.* (2017), menciona que estudos com foco em eco-design, redução de resíduos, produção mais limpa, sistemas de gestão ambiental, extensão do ciclo de vida de produtos e novas formas de lidar com o consumo são exemplos de onde o nível Micro de abrangência concentra seus esforços.

No ano 2015, a EMF (2015) afirmou não haver indicadores oficiais capazes de medir a circularidade em toda a sua abrangência. Por sua vez, Elia *et al.* (2017) afirmou não haver tantos indicadores com foco no nível micro. Essas opiniões são completamente conflitantes com as percepções de Saidani *et al.* (2019) e Walker *et al.* (2018), os quais enxergaram uma tendência nos estudos mais recentes em desenvolver indicadores direcionados ao nível de abrangência micro da EC. Ainda, na visão de Parchomenko *et al.* (2019) atualmente já existem diversas métricas capazes de avaliar a circularidade, prova disso é a relação de 63 ferramentas que o autor apresenta em seu estudo as quais foram classificadas em função de 24 elementos da Economia Circular, como mostra o QUADRO 5:

QUADRO 5 - 24 ELEMENTOS DA ECONOMIA CIRCULAR SEGUNDO PARCHOMENKO *et al.* (2019)

#	Categorias	#	Categorias
1	Disposição de Resíduos	13	Alteração do valor
2	Materiais, Componentes e Produtos de 1ª e 2ª mão	14	Uso em cascata
3	Produtividade de recursos ou Eficiência de processos	15	Modelagem dos ciclos distintos
4	Eficiência na Reciclagem	16	Perda de qualidade
5	Uso de Energia	17	Longevidade ou Vida útil dos produtos
6	Potencial de reciclagem ou remanufatura	18	Utilização de fluxos de Recursos
7	Localização geográfica	19	Valor do material Reciclável
8	Destinação Final de Materiais, Produtos e Componentes	20	Estabilidade do sistema
9	Estoque	21	Grau de mistura de Materiais
10	Informação, força de trabalho, energia	22	Escassez de insumos
11	Dificuldade de reciclar, Remanufaturar ou reusar	23	Recursos materiais
12	Retenção de Materiais, Componentes e Produtos	24	Toxicidade

FONTE: Adaptado de PARCHOMENKO *et al.* (2019).

Ainda sobre ferramentas de avaliação de circularidade e seus parâmetros, Saidani *et al.* (2019) apresenta em seu estudo uma relação de 55 ferramentas que podem ser diferenciadas em função de 10 categorias de classificação, cada uma delas com diversos critérios, conforme demonstra o QUADRO 6:

QUADRO 6 - CATEGORIAS E CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO DA ECONOMIA CIRCULAR SEGUNDO SAIDANI *et al.* (2019)

#	Categorias	Critérios			
1	Níveis	Micro	Meso	Macro	
2	Ciclos	Preservar ou Prolongar	Reusar ou Remanufaturar	Reciclar	
3	Performance	Direta (Interna/ Recirculação)	Indireta (Externa)		
4	Perspectiva	Real	Potencial		
5	Potencial de Uso	Melhoria Contínua	Comunicação	Apoio à Decisão	Aprendizagem
6	Transversalidade	Geral	Setor específico		
7	Dimensão	Indicador Único	Múltiplos Indicadores		
8	Abordagem	Quantitativa	Qualitativa		
9	Formato	Ferramenta: Fórmulas Matemáticas	Ferramenta: Planilhas de Excel	Ferramenta: Software Próprio	Ferramenta: Online (disponível na Internet)
10	Fonte	Academia	Empresas	Agentes Públicos	

FONTE: Adaptado de SAIDANI *et al.* (2019).

Utilizando como base os estudos preliminares de mapeamento de ferramentas de circularidade de Saidani *et al.* (2019) e Parchomenko *et al.* (2019), constatou-se que:

- Apenas 12 ferramentas se repetem em ambos os estudos (CE-DEA, CEIP, CEPI, CET, EVR, EWMFA, MCI, PCM, RES, RRs, SCI, ZWI);
- Há ferramentas ainda em desenvolvimento, e que, portanto, ainda não apresentam critérios bem definidos;
- Há ferramentas unidimensionais que, mesmo avaliando apenas um dos requisitos da Economia Circular (reciclagem, por exemplo) foram

consideradas pelos autores Saidani *et al.* (2019) e Parchomenko *et al.* (2019) como capazes de avaliar a circularidade.

No desenvolvimento deste trabalho, nem todas as ferramentas mapeadas por Saidani *et al.* (2019) e Parchomenko *et al.* (2019) puderam ser utilizadas para o estudo de caso. Deste total de ferramentas encontradas na Literatura, apenas 31 ferramentas foram consideradas, as quais estão descritas no QUADRO 7. Isso ocorreu principalmente em função da dificuldade em ter acessos aos materiais que deram origem a essas ferramentas. Outra dificuldade evidenciada foi a ausência de exemplos ou estudos de caso relatando a aplicação das ferramentas. De forma oposta, ferramentas como a CET, a CEIP, a MCI, os Eco-costs, a LCI entre outras possui artigos publicados relatando as experiências de aplicação em casos reais.

A seção 4.1 do Capítulo 4 apresenta uma análise comparativa das ferramentas baseada nos critérios de classificação e nas categorias definidas pelos autores Parchomenko *et al.* (2019) e Saidani *et al.* (2019) as ferramentas como indicadores para avaliar a circularidade.

QUADRO 7 - LISTA DE FERRAMENTAS DE AVALIAÇÃO DE CIRCULARIDADE

#	Sigla	Indicadores de Circularidade	Autores
1	ACT	Assessing Circular Trade-offs	Circle Economy, 2015
2	BCI	Building Circularity Indicators	Verberne, 2016
3	CA	Circle Assessment	Otero, 2015 Otero e Ordoñez, 2017 Circle Economy, 2018
4	CC	Circularity Calculator	ResCoM, 2017
5	CECAC	Circular Economy Company Assessment Criteria	Otero, 2015 Otero e Ordoñez, 2017
6	CE-DEA	Circular Economy Policy Data Envelopment Analysis	Wu <i>et al.</i> , 2015
7	CEECI	Circular Economy Efficiency Composite Index	Ma <i>et al.</i> , 2014
8	CEI	Circular Economy Index	Di Maio e Rem, 2015
9	CEIP	Circular Economy Indicator Prototype	Cayzer <i>et al.</i> , 2017
10	CEPI	Circular Economy Performance Indicator	Huysman <i>et al.</i> , 2017
11	CET	Circular Economy Toolkit	Evans e Bocken, 2013
12	CIP	Circularity Indicators Project	Smol <i>et al.</i> , 2017
13	Eco-costs	Eco-costs	Vogtländer, 2012.
14	EVR-CTF	Eco-efficient Value Ratio Circular Transition Framework	Scheepens <i>et al.</i> , 2016
15	EW-MFA	Economy Wide MFA	Haas <i>et al.</i> (2015)
16	ICT	Circularity Indicator Project	Otero, 2015 Otero e Ordoñez, 2017

17	ISRPI	Industrial Symbiosis Resource Productivity Indicator	Wen <i>et al.</i> , 2015
18	LI	Longevity Indicator	Franklin-Johnson <i>et al.</i> , 2016
19	LCI	Longevity and Circularity Indicators	Figge <i>et al.</i> (2018)
20	MCI	Material Circularity Indicator	EMF, 2015
21	MRS	Material Reutilization Score	C2C, 2012.
22	NCEIS	National CE Indicator System	Geng <i>et al.</i> , 2012
23	PCCES	P-Chemical Circular Economy System	Ma <i>et al.</i> , 2015
24	PCM	Product-Level Circularity Metric	Linder <i>et al.</i> , 2017
25	PRRR	Product Resource Recovery Routes	Singh e Ordoñez, 2016
26	REPRO	Remanufacturing Product Profiles	Gehin <i>et al.</i> (2008)
27	RPI	Reuse Potential Indicator	Park e Chertow, 2014
28	RRs	Recycling Rates	Haupt <i>et al.</i> , 2017
29	SCI	Sustainable Circular Index	Azevedo <i>et al.</i> , 2017
30	VRE	Value-based Resource Efficiency	Di Maio <i>et al.</i> , 2017
31	ZWI	Zero Waste Index	Zaman e Lehmann, 2013

FONTE: O autor (2019).

A *Assessing Circular Trade-offs* (ACT) (Circle Economy, 2015) proposta pelo grupo de pesquisa *Circle Economy/Nederland Circulair!* é uma ferramenta com habilidade de identificar qual a melhor opção de reuso do ponto de vista econômico, considerando políticas locais e condições de mercado, além de identificar as barreiras que impedem maiores percentuais de reuso. A ACT considera os insumos de produção e fatores como preços dos recursos, custos trabalhistas, impostos, energia, etc. Com ela, é possível gerar cenários variados em função de alterações nas políticas locais e nas condições mercadológicas, servindo de suporte à tomada de decisões de governantes que visem estimular o reuso nas operações produtivas.

A *Circle Assessment* (CA) (Circle Economy, 2014) é uma ferramenta quantitativa de nível de abrangência Meso, destinada a ser aplicada em organizações. Por meio de múltiplos indicadores, ela fornece as implicações da EC em termos financeiros. Criada em 2014 pelo consórcio Circle Economy and PGGM, permite mensurar a circularidade e identificar oportunidades para adotar estratégias circulares.

O *Building Circularity Indicator* (BCI) proposto por Verbenne (2016) é um indicador capaz de mensurar a circularidade em edificações e construções, sendo baseada nas ferramentas *Material Circularity Indicator* (MCI), *Product Circularity Indicator* (PCI) e *System Circularity Indicator* (SCI).

O consórcio ResCoM – *Resource Conservative Manufacturing* foi um projeto de 4 anos que envolveu 12 organizações europeias com o objetivo de desenvolver ferramentas e metodologias para a implementação de sistemas de fabricação com foco na Economia Circular, o qual foi concluído em outubro de 2017. Um dos resultados, foi a ferramenta de avaliação de circularidade *Circularity Calculator* (CC), criada pela consultoria holandesa de design IDEAL&CO Explore em parceria com a Fundação Ellen MacArthur. A CC apresenta-se como uma plataforma online capaz de comparar tipos de cenários circulares possíveis para um dado produto. Ela exibe os fluxos potenciais de massa e valor de um produto, indicando se as diferentes peças são reutilizadas, remanufaturadas e/ ou recicladas. Assim, designers são capazes de modelar diferentes soluções de design conceitual e modelos de negócios, para em seguida projetar cenários e quantificar o impacto nos índices de desempenho, como a circularidade geral, a taxa de reciclagem e o potencial de recuperação de valor (RESCOM, 2018)

O indicador *Circular Economy Index* (CEI) proposto por Di Maio e Rem (2015) é uma ferramenta quantitativa capaz de ser aplicada a qualquer produto. Seu foco é medir taxas de reciclagem considerando o valor de mercado do produto produzido pelo reciclador pelo valor de mercado do material que entra na unidade de reciclagem. Para Di Maio e Rem (2017), um produto inserido na economia circular utiliza recursos circulares na sua plenitude: os insumos são completamente absorvidos pela biosfera; os insumos são provenientes de resíduos ou são produtos de produtos reciclados e apresentam baixo valor por quilograma. No mundo ideal, os insumos causam o menor impacto ambiental possível, cria empregos e produtos de alto valor agregado.

O *Circular Economy Indicator Prototype* (CEIP) de Cayzer *et al.* (2017) é uma ferramenta que apresenta uma planilha que avalia a circularidade em função da porcentagem de material reutilizado e reciclado de um determinado produto. Ela apresenta 15 questões que são distribuídas em 5 categorias.

A ferramenta *Circular Economy Performance Indicator* (CEPI) proposta por Huysman *et al.* (2017) apresenta-se com uma metodologia quantitativa com foco em mensurar o potencial de benefício que a reciclagem de polímeros termoplásticos pode apresentar.

O *Circular Economy Toolkit* (CET) de Evans e Bocken (2013) é um indicador que recomenda áreas de desenvolvimento e uso de um produto que oferece o maior

grau de circularidade. A ferramenta apresenta 33 perguntas a serem respondidas pelo usuário em 7 categorias distintas.

A *Eco-costs* de Vogtlander *et al.* (2012) tem como característica ser uma ferramenta de avaliação quantitativa que mensura a circularidade do ponto de vista econômico.

O *Material Circularity Indicator* (MCI) proposto pela Ellen MacArthur Foundation (EMF, 2015) é uma ferramenta de avaliação de circularidade que necessita dos seguintes parâmetros: quantidade de insumos na entrada, quantidade utilizada no processo produtivo e quantidade de produtos produzidos. Ele considera também a massa de material in natura utilizado na fabricação, a quantidade de resíduos não recuperáveis após o uso e fator de utilidade do produto, dado em função do tempo de vida útil do produto. Trata-se uma ferramenta quantitativa com foco no reuso e na reciclagem, ou seja, com foco na circularidade ambiental.

O *Sustainable Circularity Index* (SCI) proposto por Azevedo *et al.* (2017) é um indicador de circularidade em relação a edificações e construções.

Ma *et al.* (2015) apresenta um histórico das iniciativas voltadas para a EC propostas pelo Governo Chinês, a partir do ano 2000, voltadas para iniciativas a serem implementadas nas cidades e nos parques industriais. No ano de 2003, o Congresso Chinês promulgou a Lei de Promoção da Produção Mais Limpa. No ano de 2012, foi promulgado o 12º Plano Quinquenal sobre o desenvolvimento da economia circular. No ano de 2014, Ma *et al.* (2014) apresentou o indicador quantitativo de abrangência meso denominado *Circular Economy Efficiency Composite Index* (CEECI) o qual pode ser aplicado para qualquer segmento industrial, apresenta interpretações do ponto de vista ambiental e cujo foco encontra-se na redução dos resíduos e no uso de matérias-primas necessárias no processo produtivo. No ano seguinte, Ma *et al.* (2015) apresentou o *P-Chemical Circular Economy System* (PCCES), um indicador de abrangência micro e meso que possui como característica ser exclusivo para indústria química, oferecer uma análise tanto quantitativa como qualitativa, ser capaz de fornecer conclusões do ponto de vista ambiental, além de estar focado na reciclagem e na redução dos insumos nos processos produtivos e nos resíduos gerados.

Por fim, em função da variedade de categorias de impacto que apresenta, Elia *et al.* (2017) aponta a ACV como uma metodologia de avaliação de impacto ambiental

de indicadores múltiplos que há anos vem sendo aplicada nos níveis macro, meso e micro. Da mesma forma, Brenner e Adamovic (2017) argumentam que a ACV se caracteriza por ser o método de avaliação mais reconhecido internacionalmente para comparar os impactos ambientais de diferentes processos e tecnologias de produção. Elia *et al.* (2017) conclui que a ACV aparenta ser a mais completa das metodologias avaliadas em seu estudo, graças à variedade de indicadores disponíveis e ao profundo detalhamento que a análise pode alcançar. Além disso, a ACV também se destacou ao avaliar as emissões de poluentes, graças aos diferentes indicadores disponíveis para calcular o impacto, tornando-se dessa forma na metodologia mais adequada para avaliar a destinação de resíduos na economia circular.

Neste contexto, é detalhado no item 2.3 a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos (ACV).

2.3 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV)

No ano de 2001 foi publicada a ABNT NBR ISO 14040, cujo título era “Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura”. Esta norma, que trazia os princípios gerais e foi posteriormente atualizada no ano de 2009, definiu a ACV como uma técnica capaz de avaliar aspectos ambientais e impactos potenciais ao longo do ciclo de vida de um determinado produto, desde a aquisição das matérias-primas, passando pela produção, uso e disposição final dos produtos. A aplicação da ACV permite: identificar oportunidades de melhoria ao longo do ciclo de vida de produtos no que diz respeito aos aspectos ambientais; servir de suporte na tomada de decisão das organizações; na identificação e escolha de indicadores capazes de avaliar o desempenho ambiental; divulgar positivamente as ações ecologicamente responsáveis adotadas pela empresa.

A estrutura de avaliação da ACV, como mostra a FIGURA 4, é segmentada em 4 fases, sendo elas: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados

FIGURA 4 - ESTRUTURA DA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA



FONTE: ABNT (2009a); ABNT (2009b).

Os requerimentos e as diretrizes para avaliação do ciclo de vida foram normatizados no ano de 2006 por meio da ABNT NBR ISO 14044 como título “Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e Orientações cujas definições serão aprofundadas na sequência.

2.3.1 Definição de Objetivo e Escopo

Na fase de definição de objetivo e escopo, primeiramente se faz a definição do objetivo do estudo, o qual deve conter a aplicação da ACV, as razões pretendidas, o público-alvo ao qual se destina o estudo e a intenção de divulgação pública dos resultados. Em seguida deve-se estabelecer o escopo, que consiste nos limites de validade do estudo, a partir da quantificação das entradas e saídas de definição do sistema de produto, da função do sistema de produto, da unidade funcional, do fluxo de referência, das fronteiras do sistema em foco, das informações relativas aos dados e da avaliação de impacto de ciclo de vida (como a seleção de categorias de impactos) e quantificar as entradas e saídas dos processos elementares (ABNT, 2009). Para

Scherer (2015) além de definir e detalhar um produto ou processo, nesta etapa são estabelecidos os limites e os efeitos ambientais que serão analisados. De acordo com ABNT NBR ISO 14.040, é imprescindível iniciar um estudo de ACV especificando o sistema estudado a partir das seguintes definições apresentadas no QUADRO 8:

QUADRO 8 - DEFINIÇÕES

Produto	Qualquer bem ou serviço
Entrada	Fluxo de matérias-primas, produtos intermediários ou co-produtos que entram em um processo
Saída	Fluxo de matérias-primas, produtos intermediários ou co-produtos que deixam um processo
Processo	Atividades inter-relacionadas que transformam entradas em saídas
Sistema de Produto	Conjunto de processos elementares Com fluxos elementares e de produtos Desempenhando uma ou mais funções Que modelam o Ciclo de Vida de um produto
Função	Ação que especifica de forma clara a característica de desempenho dos produtos
Unidade Funcional	Referência para qual se relacionam as entradas e saídas, como uma medida de desempenho das saídas do sistema de produto
Fluxo de Referência	Quantificação necessária das saídas dos processos Para cumprir a Unidade Funcional
Fronteiras do Sistema	Críterios que delimitam a abrangência de um Sistema de Produto
Categoria de Impacto	Classificação das questões ambientais levantadas na ICV.

FONTE: FERREIRA (2004); ABNT (2009).

2.3.2 Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

A segunda fase da ACV envolve a compilação e a quantificação das entradas e das saídas de um sistema de produto ao longo do ciclo de vida. Engloba a coleta de dados qualitativos e quantitativos dos processos inseridos nas fronteiras do sistema de produto avaliado. A medida que a coleta de dados avança e se conhece mais sobre o sistema alvo de estudo, novos requisitos e limitações são identificados que podem exigir a revisão das estratégias definidas para a obtenção de dados (ferramentas e instrumentos de coleta) de forma que se consiga atingir os objetivos definidos na etapa anterior. (ABNT, 2009; SCHERER, 2015). Por meio da FIGURA 5 pode-se visualizar

como os dados de ICV podem ser estruturados. Afim de que o sistema de produto seja modelado corretamente, convém que algumas medidas sejam adotadas:

- Fluxogramas gerais dos processos de todos os processos elementares;
- Descrição detalhada de cada processo elementar;
- Lista de fluxos e dados relevantes;
- Lista que identifique as unidades utilizadas;
- Descrição da coleta de dados e das técnicas de cálculo que sejam indispensáveis;
- Dispor instruções para documentar claramente quaisquer casos especiais, irregularidades ou outros itens associados aos dados fornecidos (ABNT, 2009).

FIGURA 5 - DADOS DE ICV



FONTE: UNEP (2008).

De acordo com Alvarenga (2010) e Moretti (2011), estão à disposição várias bases de dados de inventário de ciclo de vida (ICV) como: *Ecoinvent v.3.5.*, *U.S. Life-Cycle Inventory ELC*. Como exemplo, os autores fazem menção aprofundada da base de dados do inventário *Ecoinvent v.3.5*, que dispõe de mais de 4000 conjuntos

de dados de produtos e serviços como: energia, transportes, materiais de construção, produtos químicos, papel e celulose, tratamento de resíduos e agricultura.

2.3.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

Na terceira fase busca-se compreender, avaliar a magnitude e a significância dos impactos ambientais potenciais ao sistema de produto. Por ser uma abordagem relativa aplicada em cima de uma unidade funcional, a AICV distingue-se de outras técnicas como avaliação de risco, avaliação de impacto ambiental ou avaliação de desempenho ambiental. Caracteriza-se por apresentar elementos obrigatórios e opcionais. Entre os obrigatórios cita-se: seleção de categorias de impacto, indicadores de categorias e modelos de caracterização; classificação dos resultados da ICV, ou seja, sua correlação com as categorias de impacto; e a caracterização-cálculo dos resultados dos indicadores de categoria (ABNT, 2009).

Sousa (2008) e Alvarenga (2010) em suas pesquisas enumeram alguns métodos variados de AICV que compilam os resultados do ICV em categorias de pontos médios (midpoints) ou pontos finais (endpoints), como: Eco-Indicator 99, CML, Impact 2002+ e EDIP2003. Sobre o Eco-Indicator 99, Alvarenga (2010) o classifica como um método endpoint (orientado para os danos) que vem sendo utilizado no mundo inteiro para a geração de eco-indicadores de processos. Apresentado em três versões, denominadas: hierárquica, individualista e igualitária, elas consideram diferentes perspectivas culturais. O método Eco-indicator 99 (H/A), versão de classe “hierarquizada” que por apresentar ponderação média segue com a mais recomendada para aplicação nas pesquisas, realiza a avaliação de impactos em duas etapas, sendo a primeira a modelação do dano real e a segunda a normalização e ponderação.

2.3.4 Interpretação

Nesta fase, os resultados encontrados nas fases de Inventário (ICV) e de Avaliação (AICV) são confrontados com o que foi traçado na fase de definição de objetivo e de escopo, resultando em conclusões e recomendações (ALVARENGA, 2010). Como exemplo, Adissi *et al.* (2013) cita a avaliação da contribuição, dos processos ou dos fluxos elementares, para o resultado final.

De acordo com ABNT (2009), as conclusões devem ser geradas ao longo das etapas da ACV e convém que elas surjam de acordo com a sequência lógica a seguir:

- a) Diferenciar as questões relevantes;
- b) Julgar a metodologia e os resultados quanto à “completeza, sensibilidade e consistência”;
- c) Esboçar conclusões preliminares verificando se estas estão de acordo com o objetivo e o escopo do estudo;
- d) Conclusões consistentes tornam-se conclusões finais;
- e) Conclusões inconsistentes exigem que se retorne aos passos anteriores.

As recomendações precisam estar embasadas nas conclusões finais, devendo refletir uma consequência lógica e razoável de tais conclusões.

2.3.5 Fronteiras da ACV

Em função dos processos estudados, existem diferentes abordagens e nomenclaturas para a metodologia ACV. A ISO/TS 14047/2012 e a ISO/TS 14049/2012 propõem a abordagem a seguir:

- Berço ao portão (Cradle-to-gate): o processo começa com a extração de recursos, que pode incluir alguns serviços de manufatura e operações, mas exclui todas as fases subsequentes (MORETTI *et al.*, 2017; GABI, 2017)
- Berço ao túmulo (Cradle-to-grave): o processo começa com a extração das matérias-primas da natureza e estende-se até o descarte final do produto ou a

reciclagem, passando nesse intervalo pelas fases de produção, transporte e uso (SILVA e OLIVEIRA, 2014);

- Portão ao portão (Gate-to-gate): o processo no qual todas as etapas de produção ocorrem dentro da unidade fabril, não incluindo processos fora dos portões deste local.
- Portão ao túmulo (Gate-to-grave): aqui o produto é avaliado desde quando sai da produção até chegar a sua fase de utilização final, incluindo a distribuição, o uso e a disposição final do produto (GABI, 2017).

2.4 PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO

Descoberto no ano de 1839, o efeito fotovoltaico ocorre quando células fotovoltaicas convertem energia solar diretamente em eletricidade pelo processo de conversão da luz (fótons) em eletricidade (elétrons) (Ramos *et al.*, 2018). De acordo com Brenner e Abramovic (2017) um painel solar fotovoltaico, também conhecido como célula solar, é um dispositivo eletrônico capaz de converter a energia solar em energia elétrica. Apesar de haver uma ampla gama de tecnologias de células fotovoltaicas no mercado, há basicamente três gerações de tecnologias de painéis solares. O QUADRO 9 mostra como a composição química dos PSF varia de acordo com a sua geração. Já a FIGURA 6 apresenta um PSF padrão sob uma perspectiva explodida.

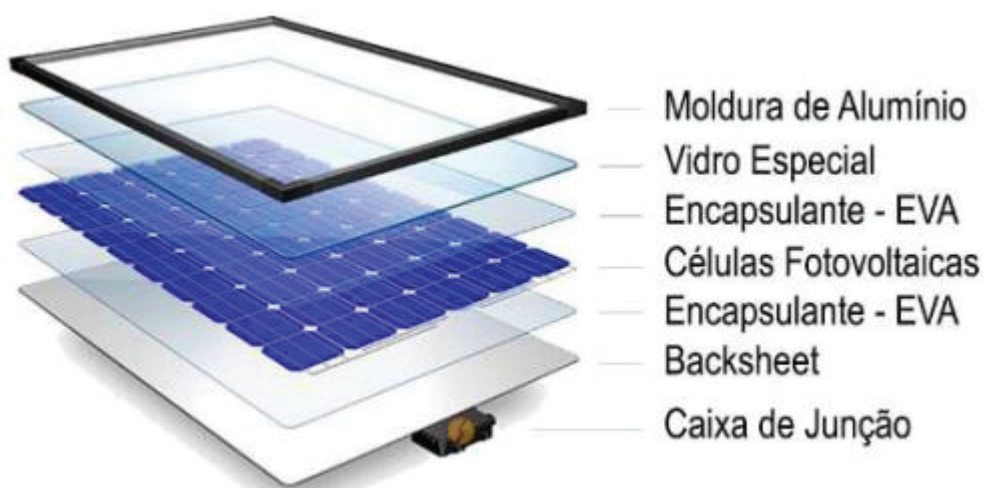
QUADRO 9 - GERAÇÕES DE PSF

Gerações de PSF	Composição	% Participação de Mercado	% Total de Resíduos
1ª Geração	<i>Wafer</i> de silício cristalino - Monocristalino - Multicristalino	85%	90%

2ª Geração	Filmes finos inorgânicos compostos por: - Telureto de Cádmio (CdTe) - Disseleneto de cobre e índio (CIS) - Disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) - Silício amorfo (a-Si)	15%	10%
3ª Geração	- Energia Solar Fotovoltaica de concentração (CPV) - PSF orgânicos - Novas Tecnologias em desenvolvimento	0%	0%

FONTE: Adaptado de ELY e SWART (2014); DIAS (2015); BRENNER e ABRAMOVIC (2017).

FIGURA 6 - MATERIAIS USADOS EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS



FONTE: GHIZONI (2016).

2.4.1 Gerações de Painéis Solares Fotovoltaicos

As células fotovoltaicas tradicionais, também chamadas de PSF de 1ª geração, são compostas por *wafers* de silício monocristalino ou multicristalino, apresentam maior eficiência tanto no uso comercial quanto no uso doméstico. As células de silício monocristalino são as que possuem uma estrutura de cristal homogênea, apresentam a maior eficiência na conversão de energia e o processo produtivo mais oneroso. Já as multicristalinas possuem estruturas de cristais não homogêneas, não são tão eficientes na conversão de energia como sua antecessora e por consumirem menos energia no processo produtivo são mais acessíveis. Células de filmes finos

correspondem à segunda geração de PSF e recebem este nome em função das várias camadas finas de materiais semicondutores. Como se pode ver no QUADRO 10, as células dessa geração ainda apresentam menor eficiência que a geração anterior, no entanto o avanço tecnológico já tem permitido células de filme fino atingirem até 21% de eficiência (RAMOS *et al.*, 2018).

QUADRO 10 - EFICIÊNCIA DE MERCADO DAS DIFERENTES TECNOLOGIAS DE PSF

Tecnologia	Eficiência da Célula	Eficiência do Módulo
Silício Cristalino		
Monocrsitalino	13% a 25,6%	21%
Multicristalino	11% a 20,8%	12% a 17%
Filme Fino		
Silício Amorfo (a-Si/ μ -Si)	4% a 20,4%	8,10%
Cádmio/Telúrio (Cd-Te)	10% a 21,0%	9% a 16%
Cobre/Índio/Gálio (di) Seleno (CIGS e CIS)	10% a 20,5%	16% a 22%

FONTE: Adaptado de ELY e SWART (2014); DIAS (2015); BRENNER e ABRAMOVIC (2017).

Os bens da cadeia de valor da energia solar podem ser classificados da seguinte forma:

- Componentes do Módulo: Silício Metalúrgico; Silício Grau Solar; Gases de Processamento; Lingote e Lâmina de Silício; Célula Fotovoltaica de Silício Cristalino;
- Materiais e Componentes do Sistema Fotovoltaico: Alumínio; Aço; Vidro; Acrílico; Policarbonato; Moldura; *Blacksheet*; Silicone de Vedação; Caixa de Junção; Filme Encapsulante;
- Equipamentos do Sistema Fotovoltaico: Módulo (RAMOS *et al.*, 2018).

A composição dos PSFs varia de acordo com a geração tecnológica. Além disso, diferentes autores relataram composições variadas em seus estudos. No que

diz respeito a PSFs de 1ª geração, os quais são constituídos de silício mono e policristalino, Sander *et al.* (2007), Wambach *et al.* (2006) e IRENA (2016) apontaram em seus estudos que esses painéis são compostos por 76% de vidro, 10% de polímeros, 8% de alumínio, 5% de silício, 1% de cobre, 0,1% de prata além de pequenas quantidades de demais metais. Com menor precisão, Tammaro *et al.* (2015) apresentou as seguintes faixas de porcentagens explicar a composição de painéis solares de 1ª geração: vidro especial (60% a 75%), célula fotovoltaica de silício (3%), moldura de alumínio (10% a 25%), encapsulante de polímero EVA (6% a 8 %), *blacksheet* PVF (0,1% a 2%), caixa de junção (1%) e outros contatos metálicos - cromo, prata e cobre – (0,1% a 1%). Já para Olson *et al.* (2013) a composição de um painel solar em função de sua massa ocorre da seguinte forma: 69% de vidro especial, 3% de *wafer* de silício, 11% do polímero EVA, 11% de moldura de alumínio, 4% de polímero PVF (Fluoreto de polivinila) no *blacksheets*, 1% de caixa de junção e 1% de cobre. Ainda no mesmo assunto, Monier e Hestin (2011), Dias (2015) e Ghizoni (2016) apresentaram em seus trabalhos percentuais que representam a composição de PSFs de 1ª e 2ª geração, os quais estão presentes no QUADRO 11 logo abaixo.

QUADRO 11 - COMPOSIÇÃO DOS MÓDULOS FOTOVOLTÁICOS DE 1ª E 2ª GERAÇÃO

Material	1ª geração	2ª geração		
	Silício Cristalino	Filmes Finos		
	c-Si	a-Si	CdTe	CIS/CIGS
Vidro	74,16%	90%	95,00%	85%
Alumínio	10,30%	<1%	<1%	12%
Polímeros (EVA+PVF)	10,15%	10%	3,50%	6%
Silício	3,00%	<0,1%	0%	0%
Zinco	0,00%	<0,1%	0,01%	0,12%
Chumbo	0,07%	<0,1%	<0,01	<0,1%
Cobre	0,57%	0%	1%	0,85%
Índio	0,00%	0%	0%	0,02%
Estanho	0,12%	0%	0%	0,03%
Telúrio	0%	0%	0,07%	0%
Cádmio	0%	0%	0,07%	0%
Prata	0,006%	0%	<0,01%	0%
Seladores (Silicone)	1,16%	0%	0%	0,00%

FONTE: ADAPTADO DE MONIER e HESTIN (2011); DIAS (2015); GHIZONI (2016).

2.4.2 Setor Solar Fotovoltaico no Brasil

No ano de 2017, o governo brasileiro sinalizou sua preocupação ao transformar o compromisso firmado com o Acordo de Paris no Decreto Presidencial 9073/2017. Assim, o Brasil se comprometeu em reduzir a emissão de gases do efeito estufa em 37% até 2025 e 43% até 2030. Uma das estratégias admitidas pelo governo foi o de concentrar investimentos em energias de fontes renováveis. No que diz respeito ao setor solar fotovoltaico, os investimentos vêm crescendo ano a ano, saindo de poucos US\$ 6 milhões em 2009 para US\$ 562 milhões em 2015 e atingindo o recorde de US\$ 985 milhões em 2016 (MME, 2016; Ramos *et al.*, 2018).

Com a intenção de apoiar o desenvolvimento da indústria fotovoltaica no país, o governo brasileiro vem desenvolvendo programas e políticas que objetivam diversificar a matriz energética nacional, a promoção da competitividade e da inovação da indústria nacional. O QUADRO 12 apresenta um resumo dos instrumentos governamentais de apoio ao setor fotovoltaico nacional.

QUADRO 12 - INSTRUMENTOS DE APOIO AO SETOR FOTOVOLTAICO

SIGLA	INSTRUMENTO	ESFERA FEDERATIVA	OBJETIVO
PNP/BNDES	Plano de Nacionalização Progressiva	Federal	Desenvolvimento da Produção Nacional
LER LEN	Leilão de Energia de Reserva Leilão de Energia Nova	Federal	Fomentar geração de energia de demanda para aquisição de equipamentos
Convênio CONFAZ 101/97	Incentivos para Módulos e Células Fotovoltaicas	Estadual	Redução de ICMS na produção
Convênio CONFAZ 16/2015	Incentivos para usuários residenciais, comerciais e industriais	Estadual	Redução de ICMS para micro e minigeração de energia
Lei 13.169/2015	Isenção de PIS/COFINS	Federal	Redução de PIS/COFINS para micro e mini geração de energia
PBE/Inmetro	Programa Brasileiro de Etiquetagem Fotovoltaico	Federal	Padronização de qualidade, segurança e eficiência energética
PADIS	Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Indústria de Semicondutores	Federal	Desenvolvimento da Produção Nacional
REIDI	Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura	Federal	Fomento da demanda e de investimentos

FONTE: Adaptado de MDIC (2018).

Ramos *et al.* (2018) afirma que por dentro dos componentes da cadeia fotovoltaica, entre 40 e 50% do custo total do equipamento se referem ao módulo fotovoltaico; entre 10 e 30% se referem ao inversor; os demais equipamentos podem variar entre 20 a 50% do custo total. Fatores como o alto investimento inicial para a construção de fábricas de células e a dependência de uma grande escala de produção para conseguir competir com os produtos importados, sobretudo chineses, impedem a instalação de fábricas comerciais, e não apenas montadores de painéis solares

fotovoltaicos, no Brasil. Por outro lado, o mercado aquecido serviu para impulsionar a indústria nacional de componentes que produzem:

- Cabeamento;
- Moldura;
- Silicone de vedação;
- Cola e outros adesivos;
- Componentes elétricos (buchas, parafusos, porcas).

Segundo a ABDI há 140 fabricantes de bens e cerca de 440 empresas que prestam serviços para o setor solar fotovoltaico no Brasil. O QUADRO 13 apresenta os dados divulgados por Ramos *et al.* (2018) sobre os fabricantes de módulos fotovoltaicos presentes no Brasil.

QUADRO 13 - FABRICANTES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS NO BRASIL

Fabricante	Localização	Tecnologia	Capacidade Produtiva Anual
Balfar Solar	Paranavaí/PR	Silício Cristalino	1,2 MWp
BYD	Campinas/SP	Silício Cristalino	200 MWp
Canadian Solar/Flex	Sorocaba/SP	Silício Cristalino	360 MWp
Csem / Sunew	Belo Horizonte/MG	Silício Cristalino	10 MWp
Globo Brasil	Valinhos/SP	Silício Cristalino	190MWp
Minasol	Araguari/MG	Silício Cristalino	N/D
Premier/ Multisolar Energy	Osasco/SP	Silício Cristalino	10 MWp
Pure Energy	Marechal Deodoro/AL	Silício Cristalino	40 MWp
S4 Solar	Suape/PE	Silício Cristalino	200MWp
Tecnometal/ DYA Solar	Campinas/SP	Silício Cristalino	25MWp

FONTE: Adaptado de RAMOS *et al.* (2018).

2.4.3 Reciclagem de Painéis Solares Fotovoltaicos

De acordo com Fthenakis (2000), Latunussa *et al.* (2016) e (Brenner e Abramovic, 2017), a reciclagem de painéis solares não é uma tarefa simples em função de seus componentes serem formados por materiais diversos. No entanto, os autores afirmam ser possível reutilizar cerca de 90% de seus materiais em novos módulos solares. Para Sica *et al.* (2018), o setor fotovoltaico pode ser um dos maiores contribuintes para a economia circular pois, com base em seu estudo, ao recuperar os componentes de 100 painéis solares foi possível produzir 42 novos painéis solares.

Pesquisas anteriores apontam que o processo de reciclagem de painéis solares passa por duas etapas. A primeira é a separação da célula fotovoltaica por meio de processos químicos ou térmicos. A segunda etapa é a limpeza da superfície dos módulos fotovoltaicos, com a remoção do revestimento antirreflexo, dos metais e do “conector n-p” para recuperar um substrato de silício que pode ser usado para reciclagem. Outra opção seria primeiro remover as células solares e então fundir os demais componentes para depois construir novos módulos a partir desses componentes (Brenner e Abramovic, 2017).

Ainda segundo Sica *et al.* (2018), diversas previsões mostram que os módulos solares que entraram em produção nas últimas décadas atingirão o final de suas vidas úteis no intervalo compreendido entre os anos de 2025 e 2030. Assim, desde já devem ser estabelecidas metas mais ambiciosas para o descomissionamento futuro de tais painéis, seja por meio da reciclagem ou da recuperação de seus componentes.

2.4.4 Projeto CABRISS

Iniciado em 1º de julho de 2015, trata-se de uma iniciativa conjunta formada por 16 empresas e institutos de pesquisa europeus que recebeu aprovação do programa desenvolvido pela União Europeia intitulado *Horizon 2020 – Research and Innovation Framework Program* – e as quais podem ser vistas na FIGURA 7.

FIGURA 7 - EMPRESAS E INSTITUTOS DE PESQUISA DO PROJETO CABRISS



FONTE: CABRISS (2014)

CABRISS é uma sigla na língua inglesa para “Implementação da Economia Circular na Indústria Fotovoltaica com base na Reciclagem, Reuso e Recuperação dos metais Índio, Silício e Prata”. Apesar do título do projeto prever seu foco na indústria fotovoltaica, os desdobramentos para as indústrias metalúrgicas, de vidro e de eletrônicos também compõem o estudo.

Os objetivos do projeto são:

- I. Desenvolver a simbiose industrial, fornecendo matérias-primas como pastas de vidro ou prata como matéria-prima para outras indústrias;
- II. Aumentar a coleta dos resíduos fotovoltaicos em toda a Europa de 40% (segundo estimativas da União Europeia no ano de 2013) para 90%;
- III. Recuperar até 90% das matérias-primas de alto valor das células e painéis PV (Silício, Índio e Prata);
- IV. Fabricar células e painéis fotovoltaicos a partir das matérias-primas recicladas, com custos menores (25% menos) e pelo menos os mesmos desempenhos (rendimento de eficiência das células) dos processos convencionais graças à

implementação de um roteiro de processamento de células solares de alto rendimento, além da fabricação de células solares híbridas de Silício a baixo custo;

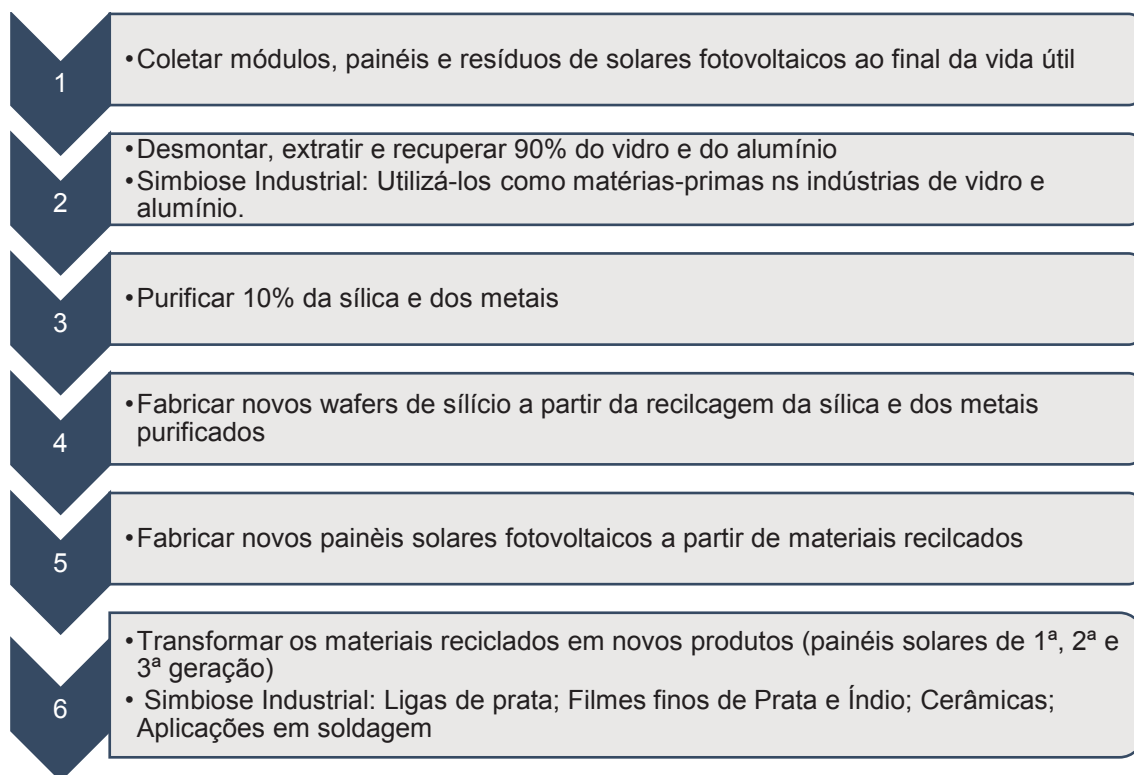
- V. Desenvolver com os cidadãos europeus e a indústria uma economia nova sustentável e financeiramente viável, a chamada economia circular.

Brenner e Adamovic (2017) afirmam que a gestão de resíduos de painéis solares fotovoltaicos do modelo apresentado pela CABRISS oferece possibilidades para cada um dos chamados “3Rs” da gestão sustentável de resíduos:

- Reduzir: pesquisa e desenvolvimento de avanços tecnológicos que possibilitem a fabricação dos painéis utilizando menos matérias-primas;
- Reuso: Com a popularização da energia solar, haverá mais componentes e materiais de painéis para serem utilizados como matérias-primas secundárias para novos painéis sem necessitar passar por processos de transformação;
- Reciclagem: Solução ambientalmente mais aceitável do que a simples disposição dos painéis que atingiram o fim da vida útil.

Além disso, um dos objetivos dos autores é comparar os resultados de ACV e CCV calculados em seu estudo com os documentados na literatura para o mesmo. O modelo de economia circular do projeto CABRISS está disponível na FIGURA 8:

FIGURA 8 - PASSO A PASSO DO PROJETO CABRISS



FONTE: Adaptado de BRENNER E ADAMOVIC (2017).

3 METODOLOGIA

Este Capítulo apresenta a proposta metodológica da pesquisa, organizando-a nas seguintes etapas: Caracterização da pesquisa; Protocolo da RSL e Etapas metodológicas.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Os aspectos metodológicos da pesquisa, os quais estão resumidos no QUADRO 14, podem ser compreendidos de diversas formas:

- Quanto à natureza de pesquisa: Aplicada, pois tem como intuito produzir conhecimentos práticos que resolvam problemas reais específicos (GIL, 1996);
- Quanto à forma de abordagem: Qualitativa e Quantitativa. Em uma pesquisa qualitativa, a realidade objetiva da pesquisa ocorre segundo a ótica do pesquisador e fundamenta-se na visão subjetiva dos autores que compõem a revisão bibliográfica (MIGUEL *et al.*, 2012). Já em uma pesquisa quantitativa, as informações observadas são traduzidas em números para que então sejam analisadas e classificadas.
- Quanto ao processo de raciocínio: Indução, pois consiste em descrever a natureza após uma série de observações (MIGUEL *et al.*, 2012);
- Quanto ao tipo de investigação: Exploratória, por realizar um levantamento bibliográfico e analisar exemplos que estimulem a compreensão do assunto estudado (GIL, 1996);
- Quanto ao método de pesquisa: Estudo de caso, já que realiza um estudo aprofundado do objeto de análise - painel solar fotovoltaico de 1ª geração – de modo que permita seu conhecimento amplo (MIGUEL *et al.*, 2012).

QUADRO 14 - CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Natureza da Pesquisa	Forma de Abordagem	Processo de Raciocínio	Tipo de Investigação	Método de Pesquisa
Aplicada	Quantitativa / Qualitativa	Indução	Exploratória	Estudo de Caso

FONTE: GIL (1996); MIGUEL *et al.* (2012).

3.2 PROTOCOLO DA RSL

Para Medeiros *et al.* (2015), o método científico tem início pela pesquisa bibliográfica, a qual tem por objetivo buscar tópicos que possuam relação com o assunto que o autor possui interesse em se aprofundar. Seguindo por essa linha de pensamento, Lakatos e Marconi (2002) afirmam que qualquer pesquisa científica tem como passo inicial a pesquisa bibliográfica e que, uma vez iniciada a pesquisa, é indispensável buscar estudos precedentes a fim de evitar trabalhos duplicados. Buscando contornar as limitações inerentes a uma revisão bibliográfica e garantir a credibilidade do estudo, Medeiros *et al.* (2015) sugere a realização de uma Revisão Bibliométrica e uma Revisão Sistemática de Literatura. Em sua obra, o referido autor apresenta um para descrever as etapas para A Revisão Sistemática da Literatura e para a Análise Bibliométrica, etapas essas que serviram de embasamento para este estudo e são apresentadas no QUADRO 15:

QUADRO 15 - CHECKLIST DA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

Etapa	Sub-etapa
Revisão Sistemática	1- Definir Objetivos
	2- Definir algoritmo de busca
	3- Escolher bases de dados pertinentes
	4- Realizar busca usando o algoritmo definido
	5- Filtrar a busca por critérios
	6- Escolher um software gerenciador de bibliografias
	7- Sistematizar a bibliografia
Análise Bibliométrica	8- Expor os indicadores bibliométricos mais pertinentes
	9- Apresentar resultados por meio de gráficos
Resultado Final	10- Escrever um relatório

FONTE: Adaptado de MEDEIROS *et al.* (2015).

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram realizadas quatro Revisões Sistemáticas de Literatura. A primeira teve como objetivo compreender o conceito de Economia Circular, o perfil das publicações a respeito do tema e os modelos de EC existentes. A segunda RSL teve como foco encontrar estudos que apresentassem ferramentas capazes de avaliar o grau de circularidade de produtos. A terceira RSL realizada buscou artigos que abordassem as formas de disposição final dos PSF. Já a quarta RSL buscou pesquisas que relacionassem ACV com PSF. Os termos “Economia Circular”, “Painel Solar Fotovoltaico” e “ACV” representam as palavras-chave desta pesquisa e, conforme sustenta Medeiros *et al.* (2015), devem compor os algoritmos de busca de uma Revisão Sistemática de Literatura. Para criar tais algoritmos, foram definidos três grupos de palavras para cada um dos três grandes temas da pesquisa, como se pode ver no QUADRO 16:

QUADRO 16 - GRUPOS E OPERADORES LÓGICOS BOOLEANOS

Grupo 1	Operador Lógico Booleano	Grupo 2	Operador Lógico Booleano	Grupo 3
Circular Economy	AND	Model	OR	Framework
				Methodology
Grupo 1	Operador Lógico Booleano	Grupo 2	Operador Lógico Booleano	Grupo 3
Circular Economy	AND	Indicators	OR	Circularity Indicators
				Index
Grupo 1	Operador Lógico Booleano	Grupo 2	Operador Lógico Booleano	Grupo 3
Photovoltaic Panels	AND	Waste	OR	Reduce
PV Technology				Recycle
PV Cells				Reuse
Grupo 1	Operador Lógico Booleano	Grupo 2	Operador Lógico Booleano	Grupo 3
LCA	AND	Photovoltaic Panels	OR	PV Technology
				PV Cells

FONTE: O autor (2019).

Dando sequência aos passos definidos por Medeiros *et al.* (2015), uma vez que os algoritmos de busca foram definidos, deve-se então selecionar as bases de dados pertinentes. As bases de dados escolhidas nessa pesquisa foram a *SciVerseScopus*, e o Google Acadêmico. De acordo com Falagas *et al.* (2008), a *Scopus*, quando comparada aos demais mecanismos de busca citados, apresenta-se como a melhor ferramenta para pesquisas bibliográficas, isso por abranger um número maior de revistas de áreas distintas, sobretudo sobre os artigos publicados após 1995.

Como critérios de busca, foram selecionados apenas “*Articles*”, “*Articles in Press*”, “*Review*”, “*Conference Papers*” e “*Conference Reviews*” no intervalo compreendido entre os anos de 2013 e 2020. Pontualmente, alguns estudos de fora deste período também foram incluídos nos resultados em função do seu relevante número de citações. Sobre os resultados encontrados na etapa de busca, Conforto *et al.* (2011) propõe um método que abrange uma pré-seleção seguido de três filtros. Assim, na etapa de Pré-seleção os resultados encontrados foram filtrados utilizando a caixa de seleção denominada “*Keywords*”, localizada do lado esquerdo na plataforma online da base *SciVerseScopus*, onde foram selecionadas seguintes categorias: “*Circular Economy*”, “*Waste Management*”, “*Waste Disposal*”, “*Recycling*”, “*Engineering*”, “*Environmental Sciences*”, “*Model*”, “*Reduce*”, “*Recycle*”, “*Reuse*”, “*Life Cycle Assessment*”, “*LCA*”. Com base nos resultados encontrados na Pré-seleção, realizou-se a primeira filtragem a qual eliminou os resultados duplicados e então reduziu os artigos encontrados em função de uma análise dos títulos, das palavras-chave e dos resumos. A segunda filtragem descartou os artigos cuja introdução e cuja conclusão estivesse em desacordo com o objetivo dessa pesquisa. Por fim, após a terceira filtragem restaram os artigos selecionados para serem lidos em sua totalidade. Todos esses dados encontram-se no QUADRO 17.

QUADRO 17 - ALGORITMOS DE BUSCA

Base de Dados	Algoritmo de Busca	Pré-seleção	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3
Scopus	"Circular Economy" AND ("Model" OR "Framework" OR "Methodology")	199	96	51	16
Scopus	"Circular Economy" AND ("Indicators" OR "Circularity Indicators" OR "Index")	195	64	38	35
Scopus	("Photovoltaic Panels" OR "PV Cell" OR "PV Technology") AND ("Reduce" OR "Reuse" OR "Recycle" OR "Waste")	214	105	33	21
Scopus	"LCA" AND ("PV Technology" OR "PV Cell" OR "Photovoltaic Panels")	75	29	22	22
Total		683	294	144	94

FONTE: O autor (2019).

O QUADRO 18 apresenta os estudos selecionados da pesquisa realizada na plataforma de buscas Google Acadêmico e que não foram encontrados anteriormente na base *SciVerseScopus*.

QUADRO 18 - ALGORITMO DE BUSCA NO GOOGLE ACADÊMICO

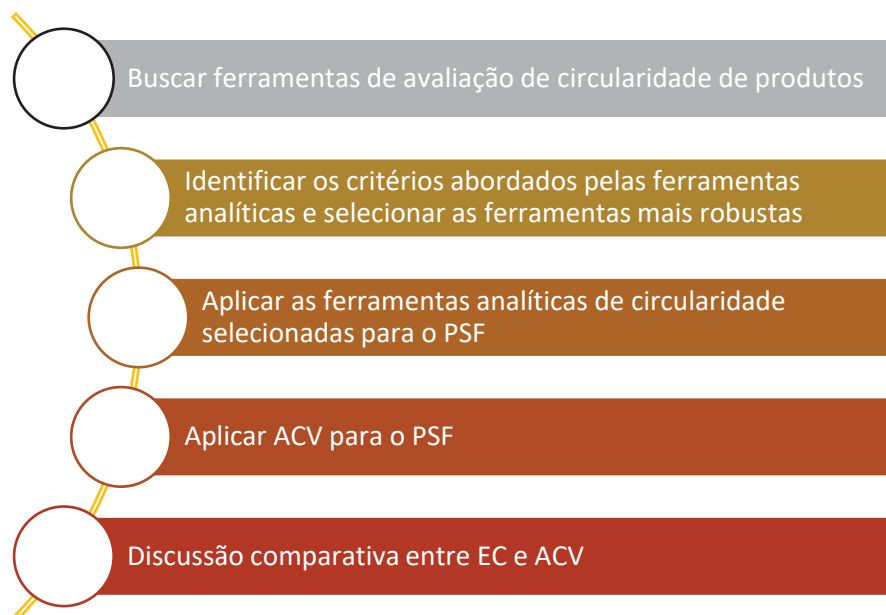
Base de Dados	Algoritmo de Busca	Artigos	Monografias	Dissertações	Teses
Google Scholar	"Reciclagem" AND "Painel Solar"	4	2	2	0
Google Scholar	"ACV" AND "Painel Solar"	0	0	3	0
Google Scholar	"Circular Economy" AND ("Model" OR "Framework")	0	0	0	0

FONTE: O autor (2019).

3.3 ETAPAS METODOLÓGICAS

Com a finalidade de concretizar os objetivos específicos deste estudo de caso em entregas reais, foram definidas as seguintes etapas metodológicas, conforme a FIGURA 9:

FIGURA 9 - DIAGRAMA DE BLOCOS COM AS ETAPAS DA PESQUISA



FONTE: O autor (2019).

3.3.1 Buscar ferramentas de avaliação de circularidade de produtos

Realizou-se uma Revisão Sistemática de Literatura com as palavras-chave “Circular Economy”, “Indicators”, “Circularity Indicators” e “Index” com os operadores lógicos booleanos “AND” e “OR” para encontrar estudos recentes que abordassem ferramentas analíticas de circularidade. Uma vez em posse dessa lista de ferramentas, a próxima etapa consistiu em estabelecer um critério capaz de compará-las com a finalidade de classificar quais seriam consideradas mais robustas e aptas para este estudo de caso. Na seção 4.1 do Capítulo 4, cujo título é “Análise e Seleção de Ferramentas de Avaliação de EC”, apresenta a justificativa que embasou a escolha pelas ferramentas CET, CEIP e MCI.

3.3.2 Identificar critérios e selecionar ferramentas mais robustas

Destacaram-se na etapa anterior os estudos conduzidos pelos autores Saidani *et al.* (2019) e Parchomenko *et al.* (2019). O primeiro apresentou em seu estudo 55 ferramentas capazes de avaliar o grau de circularidade, desenvolvidas no intervalo compreendido entre os anos de 2010 e 2017, e propôs 10 categorias para classificar,

diferenciar e orientar qual a ferramenta mais adequada para um determinado uso. O segundo, por sua vez, apresentou uma relação com 63 ferramentas de avaliação de circularidade, desenvolvidas entre os anos de 2007 e 2017 por diversos autores, propondo 24 categorias distintas para avaliar o grau de circularidade.

Já retratados na seção 2.2 do capítulo de Revisão de Literatura, os critérios definidos pelos autores Saidani *et al.* (2019) e Parchomenko *et al.* (2019) para diferenciar e classificar as ferramentas de circularidade foram utilizados para analisar as ferramentas de avaliação de circularidade encontradas na Revisão de Literatura. Apesar dos estudos dos autores citados terem identificados respectivamente 55 e 63 ferramentas de circularidade, apenas 31 delas ofereciam materiais orientativos e estudos disponíveis para serem estudados com mais profundidade a ponto de serem aplicáveis ao objeto de estudo deste trabalho. Numa primeira filtragem, 8 ferramentas foram excluídas em função do nível abrangência de aplicação ser “Macro” ou “Meso”. Uma segunda filtragem excluiu as ferramentas cujos campos de aplicação fossem muito restritos (construção civil, polímeros ou produtos químicos). Assim, a lista final foi reduzida para 20 ferramentas, as quais estão presentes no QUADRO 20 da seção 4.1 do Capítulo 4. Essas 20 ferramentas se caracterizam pelo nível de abrangência “Micro” e por serem aplicáveis a produtos de qualquer segmento.

3.3.3 Aplicar as ferramentas de circularidade no PSF selecionado

Como já foi dito, o QUADRO 20 da seção 4.1 apresenta as ferramentas. Para selecionar quais delas seriam aplicadas de fato no objeto de estudo, definiu-se mais um critério: o atendimento aos 6 objetivos da EC traçados pela Fundação Ellen MacArthur. Assim, a classificação dessas ferramentas em função deste critério está sintetizada no QUADRO 21. Como resultado, as ferramentas identificadas como sendo mais robustas foram a CET de Evans e Bocken (2013), a CEIP de Cayzer *et al.* (2017) e a MCI da Fundação Ellen MacArthur (2015).

3.3.4 Aplicar ACV para o PSF

De acordo com Elia *et al.* (2017), existem várias metodologias de avaliação ambiental que se diferenciam em função do foco da análise, ou seja, à quantidade de requisitos da Economia Circular, estabelecido pelos autores, que cada uma das metodologias é capaz de atender: O mesmo critério utilizado para classificar quais ferramentas de circularidade seriam consideradas mais robustas também foi aplicado pelo autor Elia *et al.* (2017) quando este avaliou 15 metodologias de avaliação de impacto ambiental. O QUADRO 19 apresenta um resumo das potencialidades de cada metodologia para avaliar a CE de acordo com suas principais características.

QUADRO 19 - METODOLOGIAS DE ANÁLISE AMBIENTAL DE ACORDO COM OS REQUISITOS DA ECONOMIA CIRCULAR

Metodologia	Redução de insumos e do uso de recursos naturais	Aumento da participação de recursos renováveis e recicláveis	Redução das Emissões	Redução das perdas valiosas de materiais	Aumento do valor da durabilidade dos produtos
ACV	SIM	SIM	SIM	SIM	
SFA	SIM	SIM	SIM	SIM	
MFA	SIM	SIM		SIM	
WF	SIM		SIM	SIM	
CF	SIM	SIM	SIM		
EPMS/SEFI	SIM	SIM	SIM		
SPI/DAI	SIM	SIM	SIM		
EF	SIM				
MIPS	SIM				
EDP	SIM				
CED		SIM			
EE		SIM			
EMA		SIM			
EXA		SIM			
ER	SIM				

FONTE: Adaptado de ELIA *et al.* (2017).

O estudo de Elia *et al.* (2017) concluiu que a ACV é a ferramenta de avaliação de impacto ambiental mais robusta em função da variedade de indicadores disponíveis e da análise profunda que ela permite. Com o mesmo entendimento, Brenner e Adamovic (2017) afirmam que a ACV corresponde ao método de avaliação de impactos ambientais mais reconhecido internacionalmente para diferentes processos e tecnologias de produção.

Uma vez definido o objeto de estudo, parte-se para a definição dos elementos essenciais para uma ACV que são as seguintes definições: objetivo e escopo, função, entradas e saídas, sistema de produto, processos, unidade funcional, fluxo de referência, inventário do ciclo de vida (ICV), método de análise do ciclo de vida (AICV), interpretação dos resultados, conclusões, reflexões em relação ao objetivo e ao escopo previamente definidos e as recomendações finais.

A metodologia ACV foi previamente apresentada na seção 2.3 do Capítulo 2. Os resultados da ACV serão apresentados no Capítulo 6. Por ocasião, apresenta-se aqui nesta seção os parâmetros da ACV utilizados ao estudar o PSF escolhido como objeto de estudo:

- Objetivo: Avaliar os impactos ambientais gerados pelo painel solar fotovoltaico de silício monocristalino 350M6K-36-SÉRIE-5BB fabricado pela empresa BYD;
- Unidade Funcional: Gerar 10946,322 kW.h ao longo de 25 anos;
- Fluxo de Referência: 1 PSF de silício monocristalino 350M6K-36-SÉRIE-5BB fabricado pela empresa BYD;
- Função: Gerar energia elétrica;
- Abordagem de ciclo de vida: Berço ao túmulo (desde a extração da matéria-prima até a destinação final);
- Sistema: PSF
- Limite: PSF de silício monocristalino 350M6K-36-SÉRIE-5BB fabricado pela empresa BYD;
- Base de dados de Ciclo de Vida: Ecoinvent (versão 3.5);

- Método de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida: IMPACT2002+ (versão 2.14)
- Software: SimaPro 9.0.0, da fabricante holandesa Pre-Consultants.

3.3.5 Discussão comparativa entre EC e ACV

Os resultados encontrados após a aplicação das ferramentas de avaliação de circularidade de produtos sobre o objeto de estudo forneceram um panorama completo sobre o quão circular o PSF de silício monocristalino estudado encontra-se atualmente no cenário brasileiro. Neste momento se faz necessário reforçar que o fato de um produto ser mais ou menos circular não implica automaticamente que ele seja mais eficiente para o meio ambiente, já que entre as soluções circulares possíveis, existem alternativas que acarretam em um menor desempenho ambiental. Assim, espera-se que com o estudo de ACV sobre o objeto de estudo se possa validar essa percepção inicial.

A discussão comparativa entre a aplicação das ferramentas de circularidade CET, CEIP e MCI com a metodologia ACV serão apresentados no Capítulo 7.

4 ANÁLISE E SELEÇÃO DE FERRAMENTAS DE AVALIAÇÃO DE EC

4.1 ANÁLISE COMPARATIVA DAS FERRAMENTAS ANALÍTICAS DE CIRCULARIDADE

A seção 2.2 do Capítulo 2 apresentou no QUADRO 7 uma lista com 31 ferramentas de avaliação de circularidade encontradas na Revisão de Literatura. Para Merli *et al.* (2018), pesquisadores de todo o mundo tem desenvolvido modelos e ferramentas capazes de orientar e auxiliar tanto as empresas quanto os governos na transição da economia linear para a EC.

Os estudos propostos por Saidani *et al.* (2017), Elia *et al.* (2017), Pauliuk (2018), Mesa *et al.* (2018) e Walker *et al.* (2018) apresentaram indicadores de circularidade de nível micro. No Capítulo 2 foram apresentados os Quadros 6 e 7 os quais expõem, respectivamente, 10 indicadores propostos por Saidani *et al.* (2019) e 24 indicadores propostos por Parchomenko *et al.* (2019) para avaliar o grau de circularidade de produtos. O QUADRO 120 apresenta e compara os indicadores de circularidade apontados por Parchomenko *et al.* (2019) e Saidani *et al.* (2019) com os objetivos da Economia Circular definidos pela EMF (2015). Na primeira coluna do QUADRO 20 estão presentes os critérios selecionados por essa pesquisa dentre todos os propostos nos trabalhos dos autores EMF (2015), Parchomenko *et al.* (2019) e Saidani *et al.* (2019).

QUADRO 20 - CRITÉRIOS ADOTADOS NA PESQUISA

#	Crítérios Adotados	Crítérios de circularidade propostos por EMF (2015)	Crítérios de circularidade propostos por Parchomenko <i>et al.</i> (2019)	Crítérios de circularidade propostos por Saidani <i>et al.</i> (2019)
1	Nível de Abrangência "MICRO"			
2	Indicador <u>generalista</u> (aplicável a qualquer segmento industrial)			
3	Indicador Qualitativo			

4	Indicador Quantitativo			
5	Reduzir Uso de Matérias-Primas In Natura			
6	Reduzir Resíduos			
7	Manter ou Prolongar a Durabilidade			
8	Reusar ou Redistribuir			
9	Reparar ou Remanufaturar			
10	Reciclar			

Fonte: O autor (2019).

Conforme a explicação do Capítulo 2, seção 2.2, os estudos de Parchomenko *et al.* (2019) e Saidani *et al.* (2019) mapearam 63 e 55 ferramentas de avaliação de circularidade, respectivamente. No entanto, nem todas as ferramentas mapeadas por esses autores puderam ser aproveitadas. Assim, da Revisão de Literatura foram consideradas para essa etapa 31 ferramentas genéricas capazes de avaliar a circularidade. Tendo em vista que o objetivo deste estudo consiste em avaliar a circularidade de um produto (PSF), ferramentas cujo “Nível de Abrangência” não fossem do tipo “Micro” acabaram por serem excluídas dessa etapa. Assim, em função desse primeiro critério, 8 ferramentas foram excluídas da análise: ACT (Macro e Meso), CE-DEA (Macro), CEECI (Meso), CIP (Macro), EW-MFA (Macro), ISRPI (Macro), NCEIS (Macro e Meso) e ZWI (Macro).

Sobre as 23 ferramentas restantes foi aplicado um segundo critério de redução, o “Campo de Aplicação”. Assim, foram mantidas apenas as ferramentas genéricas, sendo excluídas aquelas que estivessem restritas algum nicho específico. Como resultado, as ferramentas BCI (Construção Civil), CEPI (Polímeros Termoplásticos) e PCCES (Indústria Química) foram excluídas da análise.

Das 31 ferramentas iniciais, após as exclusões criteriosas já mencionadas, restaram 20, todas genéricas (não restritas a algum segmento industrial específico) e capazes de serem aplicadas para produtos (nível de abrangência “Micro”). No

QUADRO 20, essas ferramentas foram confrontadas com os objetivos da Economia Circular definidos pela Ellen MacArthur Foundation no ano de 2013.

QUADRO 21 - CRITÉRIOS E FERRAMENTAS

#	Sigla	Reduzir Uso de Matérias- Primas In Natura	Reduzir Resíduos	Manter ou Prolongar a Durabilidade	Reusar ou Redistribuir	Reparar ou Remanufaturar	Reciclar	Crítérios Atendidos
1	MCI	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	6
2	CEIP	NÃO	SIM	NÃO	SIM	SIM	SIM	4
3	CET	NÃO	SIM	NÃO	SIM	SIM	SIM	4
4	ECO- COSTS/ VALUE RATIO (EVR)	SIM	NÃO	NÃO	SIM	SIM	SIM	4
5	ICT	NÃO	SIM	NÃO	SIM	SIM	SIM	4
6	LCI	SIM	NÃO	NÃO	SIM	SIM	SIM	4
7	SCI	SIM	NÃO	NÃO	SIM	SIM	SIM	4
8	CA	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM	SIM	3
9	CC	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM	SIM	3
10	CECAC (VBDO)	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM	SIM	3
11	LI	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM	3
12	MRS	SIM	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	SIM	3
13	PRRR	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM	SIM	3
14	RPI	SIM	NÃO	NÃO	SIM	SIM	NÃO	3
15	VRE	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM	SIM	3
16	CEI	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	1
17	EVR CTF	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	1
18	PCM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	1
19	REPRO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	1
20	RRs	Sim	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	1

FONTE: O autor (2019).

O QUADRO 21 apresenta a correlação das 20 ferramentas de avaliação de EC de abrangência Micro com os requisitos da EC definidos no estudo apresentado no ano de 2015 pela *Ellen MacArthur Foundation*. Foi proposta uma classificação de acordo com o número de critério que cada ferramenta atendia. Como resultado, a ferramenta *Material Circularity Indicator* (EMF, 2015), proposta pela própria *Ellen MacArthur Foundation* mostrou-se a única capaz de atender a todos os requisitos da EC definidos para esse estudo. Em segundo lugar houve um empate entre 6 ferramentas (CEIP, CET, Eco-Costs/ Value Ratio (EVR), ICT, LCI e SCI) as quais apresentaram 4 requisitos da EC cada uma. Saidani *et al.* (2017) apresentou um estudo comparando as ferramentas MCI, CEIP e CET. Por sua vez, Walker *et al.* (2018) aplicou as ferramentas MCI, Eco-Costs / Value Ratio (EVR), CEIP e CET em 5 estudos de caso e comparou seus resultados com um estudo de Avaliação de Pegadas de Carbono. Em função desses estudos, definiu-se as ferramentas CET, CEIP e MCI como sendo as eleitas para este estudo de caso.

4.1.1 Circular Economy Toolkit (CET)

Desenvolvida na Universidade de Cambridge, a ferramenta Circular Economy Toolkit (CET), proposta por Evans e Bocken (2013), apresenta-se como um método de avaliação de circularidade qualitativo composto por 35 perguntas distribuídas em 7 categorias:

1. Projeto, Manufatura e Distribuição;
2. Uso;
3. Preservar ou Reparar;
4. Reusar ou Redistribuir;
5. Reformar ou Remanufaturar;
6. Reciclar;
7. Produto como um Serviço.

O QUADRO 22 a seguir apresenta as 35 perguntas distribuídas ao longo das categorias de classificação da ferramenta:

QUADRO 22 - RESULTADO DA CET SOBRE O OBJETO DE ESTUDO

#	1.Projeto, Manufatura e Distribuição	Baixo	Médio	Alto	
1	Sem materiais usados em excesso				Alto desperdício de materiais
2	Produto é totalmente desmaterializável				Pode ser reduzido através do redesign do processo
3	100% biodegradável				Alto percentual de materiais não biodegradáveis
4	100% materiais provenientes de reciclagem				Alto percentual de matérias-primas in natura; Presença de materiais não recicláveis
5	Ausência de materiais escassos no produto				Produto contém materiais escassos: Antimônio, Cobalto, Gálio, Germânio, Índio, Platina, Paládio, Nióbio, Neodímio e Tântalo.
6	Materiais eco-eficientes (baixo consumo de energia e baixa emissão de carbono na produção)				Materiais usados tem baixa eficiência ecológica
7	Ausência de materiais tóxicos no produto				Excesso de produtos tóxicos no produto
8	Zero resíduos na fabricação				Excesso de resíduos gerados na fabricação
9	100% dos resíduos são usados como insumos em outros processos produtivos				Quantidade significativa de resíduo é destinada a Aterros Sanitários
#	2.Uso (Pelo Consumidor)	Baixo	Médio	Alto	
10	Falhas do produto raramente ocorrem				Falhas do produto são frequentes
11	Produto com ciclo de vida longo				Produto com ciclo de vida curto
12	Produto não necessita ou faz baixo uso de energia elétrica				Produto desperdiça energia elétrica e gera resíduos
#	3.Preservar ou Reparar o produto	Baixo	Médio	Alto	
13	Custo de reparar o produto supera o custo de aquisição de um novo produto				Custo de reparo é baixo quando comparado a um produto novo

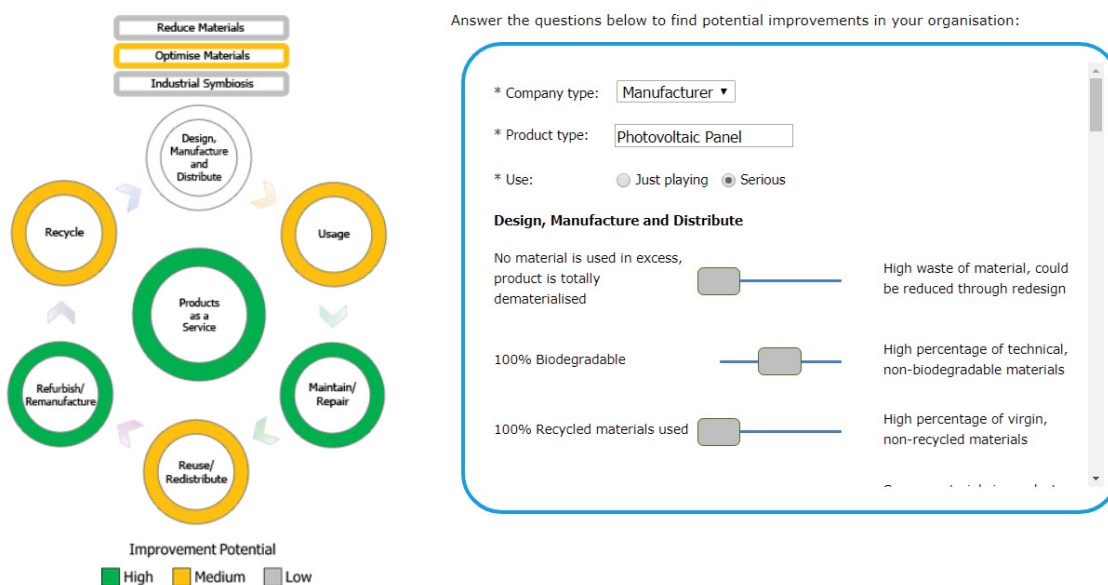
14	Serviço de reparo e manutenção são oferecidos (Diagnóstico, substituição de componentes, Suporte técnico, Instalação, Garantia)				Produto sem serviço de reparo ou manutenção
15	Dificuldade em acessar o funcionamento interno				Facilidade em acessar o funcionamento interno
16	Funcionamento complexo, de difícil compreensão				Funcionamento simples, de fácil compreensão
17	Não há padronização de componentes, conectores, módulos e dispositivos				Componentes, conectores, módulos e dispositivos são padronizados
18	Diagnóstico trabalhoso				Diagnóstico fácil
#	4.Reusar ou Redistribuir	Baixo	Médio	Alto	
19	Não há mercado de segunda-mão				Existe um mercado de segunda-mão
20	São oferecidas vendas de produtos de segunda-mão				Não são oferecidas vendas de produtos de segunda-mão
21	Produto apresenta ciclo de vida bem estendido				Produto apresenta ciclo de vida bem curto
#	5.Reformar ou Remanufaturar	Baixo	Médio	Alto	
22	Remanufatura/Conserto de alto custo				Remanufatura/Conserto de baixo custo
23	Alto custo para coletar o produto e encaminhá-lo para o fabricante				Baixo custo para coletar o produto e encaminhá-lo para o fabricante
24	Todos os produtos são consertados e remanufaturados				Nenhum produto é consertado ou remanufaturado
25	Desmontagem trabalhosa				Desmontagem simples
26	Danos significativos causados ao produto ou aos seus componentes durante a desmontagem				Sem danos significativos ao produto ou aos seus componentes durante a desmontagem
27	Impossível identificar os componentes após a desmontagem				Componentes são identificados com facilidade após a desmontagem
28	Não há partes modulares que permitam fácil substituição				Produto com partes modulares que permitam fácil substituição
29	Impossível fazer upgrade de componentes				Possibilidade de fazer upgrade de componentes

30	Muitas componentes e processos mecânicos (Soldas, parafusos e rebites)				Poucos componentes e processos mecânicos (Soldas, parafusos e rebites)
31	Muitas ferramentas são necessárias para a desmontagem				Poucas ferramentas são necessárias para a desmontagem
#	6.Produto como um Serviço	Baixo	Médio	Alto	
32	Não há Mercado para comercializar o produto como um serviço				Bom mercado para vender os produtos como um serviço
33	Todos os produtos já são comercializados como serviço				Nenhum produto é comercializado como serviço
#	7.Reciclar produto ao atingir o fim da vida útil	Baixo	Médio	Alto	
34	Produto é formado por poucos materiais distintos				Produto é formado por muitos materiais distintos
35	Materiais são facilmente separados na reciclagem				Materiais oferecem dificuldade para serem separados na reciclagem

FONTE: O autor (2019).

Nota-se que para cada uma das perguntas do questionário existem 3 opções de respostas quanto ao potencial de melhoria de circularidade: Baixo, Médio ou Alto. Uma vez respondida todas as perguntas da respectiva categoria, pode-se observar na FIGURA 10 que o potencial de melhoria apresenta a classificação qualitativa “Alta” na cor verde, “Média” na cor amarela e “Baixa” na cor cinza.

FIGURA 10 - CIRCULAR ECONOMY TOOLKIT (CET)



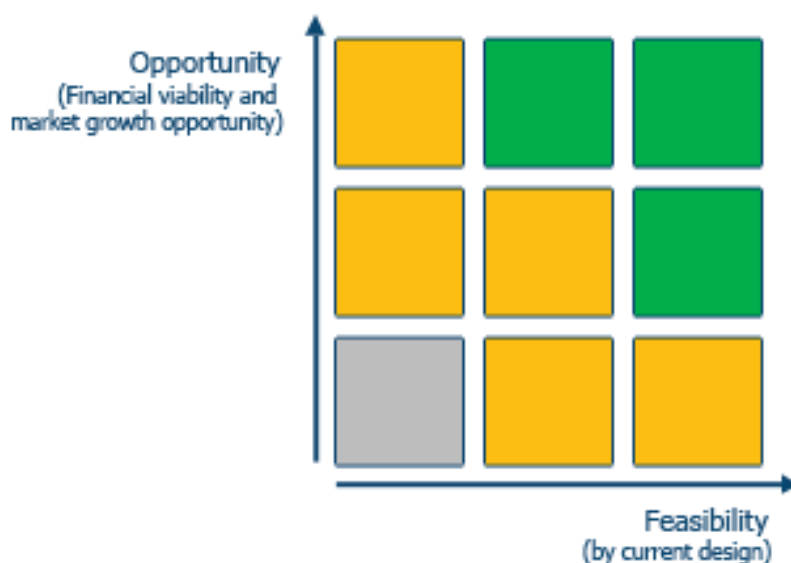
FONTE: <http://circulareconomytoolkit.org/Assessmenttool.html> (2019).

O CET é o resultado da compilação das informações coletadas pelos autores através da revisão de literatura, de *surveys* e suas observações pessoais em workshops realizados. Como resultado de sua aplicação, a CET fornece a indicação de oportunidades de negócio e de melhoria do ponto de vista econômico e do projeto do produto.

Para as categorias “Projeto, Manufatura e Distribuição”, “Uso” e “Reciclagem” a ferramenta considera apenas o projeto do produto, fazendo um ranking em função da média aritmética das respostas fornecidas pelo usuário, atribuindo os seguintes valores para cada resposta: Baixo = 1; Médio = 2; Alto = 3. As demais 4 categorias (“Manter ou Reparar”; “Reusar ou Redistribuir”; “Reparar ou Remanufaturar” e “Produto como um Serviço”) são consideradas como serviços e seus resultados são avaliados em função da oportunidade que o projeto atual do produto pode gerar. Para tanto, considera-se a viabilidade financeira (o potencial de crescimento no mercado) e a viabilidade técnica (do atual projeto do produto). A avaliação pode ser traduzida graficamente numa matriz 3x3, onde a abscissa é a “Viabilidade Financeira” e a ordenada é a “Viabilidade Técnica”, conforme a FIGURA 7 abaixo. O gráfico deve ser interpretado da seguinte forma: se houver uma grande oportunidade econômica e o projeto atual do produto é adequado, o produto é classificado como de “Grande Potencial”.

Por outro lado, se o projeto do produto não favorecer o serviço e houver baixa oportunidade de negócio, o produto será classificado como de “Baixo Potencial”. Da mesma forma que na FIGURA 11, as áreas de cores verde representam oportunidades de grande potencial; as áreas de cor amarela representam oportunidades de médio potencial; e a área cinza representa uma área de baixo potencial.

FIGURA 11 - MATRIZ 3X3 – VIABILIDADE FINANCEIRA X VIABILIDADE TÉCNICA



FONTE: <http://circulareconomytoolkit.org/Assessmenttool.html> (2019).

O primeiro campo a ser preenchido na ferramenta é o “*Company Type*” que na verdade representa qual é o perfil da pessoa que está aplicando a ferramenta. As opções disponíveis são: “Fabricante”, “Distribuidor”, “Varejista”, “Comprador” e “Consumidor”. Em seguida há um campo aberto para escrever o nome do produto que se deseja avaliar com a ferramenta. Na sequência deve-se selecionar qual o grau de seriedade que o usuário deseja obter, podendo escolher entre “Simulação sem compromisso” ou “Simulação com seriedade”. Vencidas essas etapas, chega-se finalmente às 35 perguntas segmentadas nas 7 categorias já informadas anteriormente.

4.1.2 Circular Economy Indicator Prototype (CEIP)

Desde o princípio a ferramenta CEIP proposta por Cayzer *et al.* (2017) foi desenvolvida para ser aplicada por fabricantes e por empresas de varejo que tivesse acesso à lista de materiais dos produtos. Ela se apresenta na forma de uma planilha do Microsoft Office Excel com um questionário composto por 15 perguntas distribuídas em 5 áreas de avaliação, as quais são:

1. Projeto
2. Manufatura;
3. Marketing e Venda;
4. Uso;
5. Fim da Vida útil.

Uma vez que o questionário foi respondido, a ferramenta fornece uma representação gráfica em função de suas 5 áreas de avaliação e mensura o resultado de forma quantitativa em forma de porcentagem, a qual leva em consideração: a porcentagem de material reciclado no produto final; a porcentagem de material reusado no produto final; a porcentagem de material do produto que será reciclável ao fim de sua vida útil e a porcentagem de material que será reutilizável também ao final de sua vida útil.

Como dito anteriormente, a CEIP é segmentada e 5 estágios do ciclo de vida. O primeiro estágio, “Projeto” apresenta 3 perguntas, cuja pontuação total equivale a 27 pontos. O segundo estágio, “Manufatura”, é composto por 2 perguntas que podem atingir até 25 pontos. O terceiro estágio, cujo título é “Marketing e Vendas”, é composto por 3 perguntas que chegam a somar 30 pontos. O penúltimo estágio, denominado “Uso”, apresenta 4 questões que podem atingir o somatório de 30 pontos. Por fim, o 5º e último estágio cujo nome é “Fim da Vida Útil” é composto por 3 perguntas que podem atingir até 30 pontos. Assim, caso o produto avaliado apresente resposta afirmativa para todas as 15 questões propostas pela ferramenta, o valor máximo a ser atingido será de 152 pontos, o que corresponderia ao score de 100%. O QUADRO 23 apresenta as 15 questões e suas respectivas pontuações, segmentadas em cada um dos 5 estágios definidos pelos autores da ferramenta.

QUADRO 23 - QUESTÕES PROPOSTAS PELA FERRAMENTA CEIP

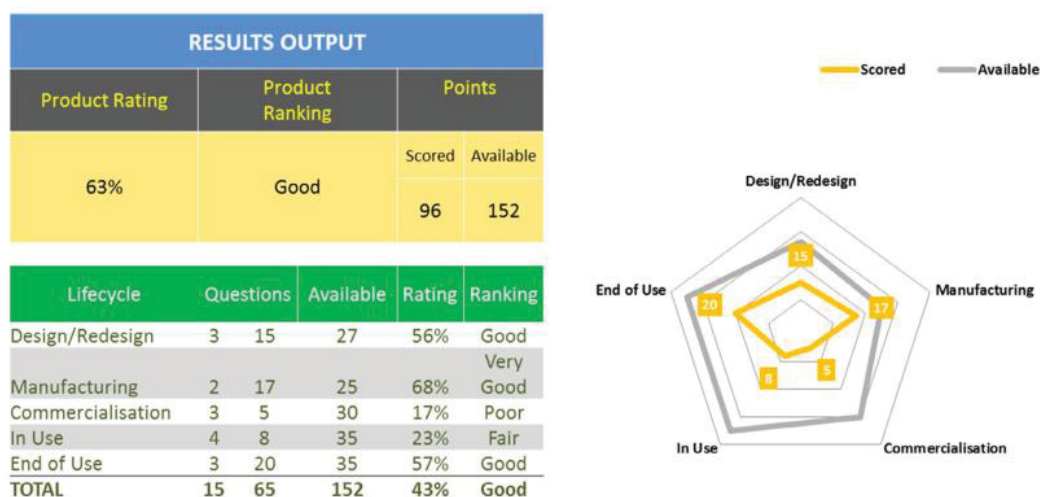
Estágio de Ciclo de Vida	#	Questão	Variável avaliada	Pontuação	Princípios da EC
Projeto	1	O produto é feito de materiais reciclados ou reutilizados?	Uso de materiais	20	Seleção de insumos; Pensamento em cascata
	2	O novo produto é mais leve que seu antecessor?	Desmaterialização	2	Seleção de insumos
	3	O produto apresenta uma lista completa de materiais e substâncias?	Lista de Materiais	5	Identificação de insumos e substâncias
Manufatura	4	Há uma lista completa de gasto energético do processo produtivo?	Gestão energética	10	Identificação energética;
	5	Há uma lista completa de resíduos sólidos do processo produtivo?	Gestão de resíduos	15	Gestão de resíduos;
Marketing e venda	6	Quais embalagens estão sendo utilizadas?	Embalagem / Acondicionamento	5	Pensamento em cascata; Insumos; Resíduos
	7	Qual é o tempo de garantia do produto?	Garantia do produto	10	Pensamento em cascata; Resíduos;
	8	O produto pode ser alugado ao invés de adquirido?	Serviço de locação	15	Diversidade
Uso	9	É possível reconhecer o estado do produto antes de uma possível falha?	Estado do produto	15	Pensamento em cascata; Resíduos
	10	Existe serviço de reparo para o produto?	Serviço de reparo	5	Pensamento em cascata; Resíduos

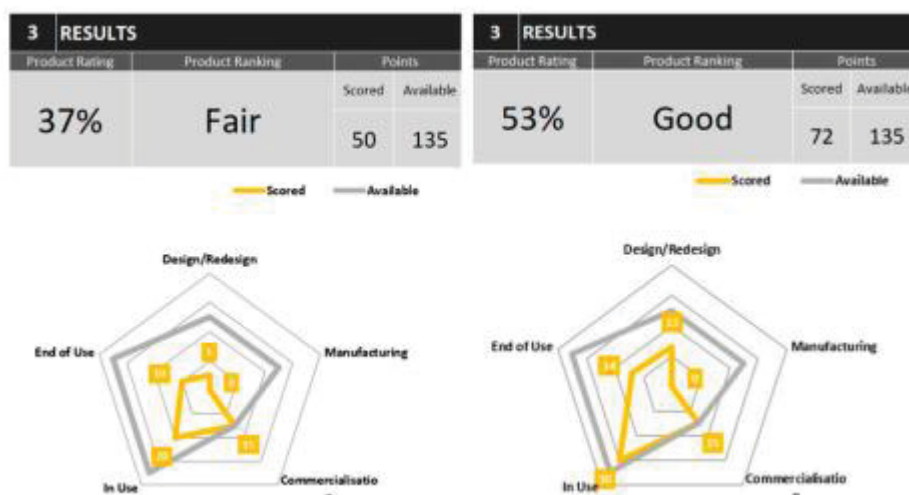
	11	O produto pode ser reutilizado em mercado de segunda mão?	Possibilidade de reuso	10	Pensamento em cascata; Resíduos
	12	O uso deste produto implica na redução de consumo de outros produtos ou na geração de resíduos?	Redução de resíduos	5	Redução de resíduos
Fim da Vida Útil	13	O produto apresenta possibilidade de ser reaproveitado?	Recuperação do produto: Esquema de retorno	15	Pensamento em cascata; Insumos; Resíduos
	14	O produto pode ser desmontado? Suas partes podem ser reaproveitadas?	Recuperação do produto: Separação	10	Pensamento em cascata; Insumos; Resíduos
	15	Os materiais que compõem o produto podem ser reinseridos em processos produtivos?	Recuperação do produto: Reuso ou Reciclagem	10	Pensamento em cascata; Insumos; Resíduos

FONTE: Adaptado de CAYZER *et al.* (2017).

A representação gráfica proposta pela ferramenta pode ser conferida na FIGURA 12 logo a seguir:

FIGURA 12 - CIRCULAR ECONOMY INDICATOR PROTOTYPE (CEIP)





FONTE: CAYZER *et al.* (2017); WALKER *et al.* (2018).

4.1.3 Índice de Circularidade Material ou *Material Circularity Indicator* (MCI)

Desenvolvido no ano de 2015 pela empresa *Granta Design* em parceria com a Ellen MacArthur Foundation, trata-se de um indicador, na forma de uma planilha de Microsoft Office Excel, capaz de avaliar o grau de circularidade em relação a um produto ou a uma empresa (abordagem de nível Micro). Considerando a intensidade e a duração do uso de um determinado produto, o MCI é capaz de medir o quanto os fluxos lineares podem ser minimizados e os fluxos restaurativos podem ser maximizados (Elia *et al.*, 2017). Para Saidani (2017), o MCI é uma ferramenta criada para as empresas avaliarem seus produtos e modelos de negócio dentro do contexto da Economia Circular que permite mensurar de forma quantitativa o desempenho circular de um produto. Linder *et al.* (2017) considera o MCI como a ferramenta de pretensão mais ambiciosa para avaliar a circularidade de produtos ao apresentar dois fatores de avaliação: o índice de fluxo linear e o fator de utilidade.

- Índice de Fluxo Linear: Fluxo de massa de materiais, combinando diferentes materiais e componentes em um indicador único;
- Fator de Utilidade: Estimativa média de vida útil do produto.

De acordo com Cayzer *et al.* (2017), a MCI exige que 6 atributos sejam respondidos para poder fornecer seu resultado numérico:

1. Percentual de material reutilizado;

2. Percentual de material reciclado;
3. Eficiência de reciclagem nas etapas de fabricação;
4. Eficiência de reciclagem após o fim da vida útil do produto;
5. Vida útil do produto;
6. Unidade funcional em relação à média do segmento.

Como se pode ver na FIGURA 13, o fluxo de materiais apresenta linhas tanto contínuas quanto tracejadas. As linhas tracejadas significam que a metodologia não exige que o ciclo seja fechado, permitindo assim que sejam utilizadas matérias-primas recicladas provenientes de outros produtos e que foram obtidas diretamente no mercado. Deve-se ressaltar também que esta figura não descreve os fluxos de resíduos que ocorrem no decorrer do processo de fabricação.

FIGURA 13 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS FLUXOS DE MATERIAIS (MCI)

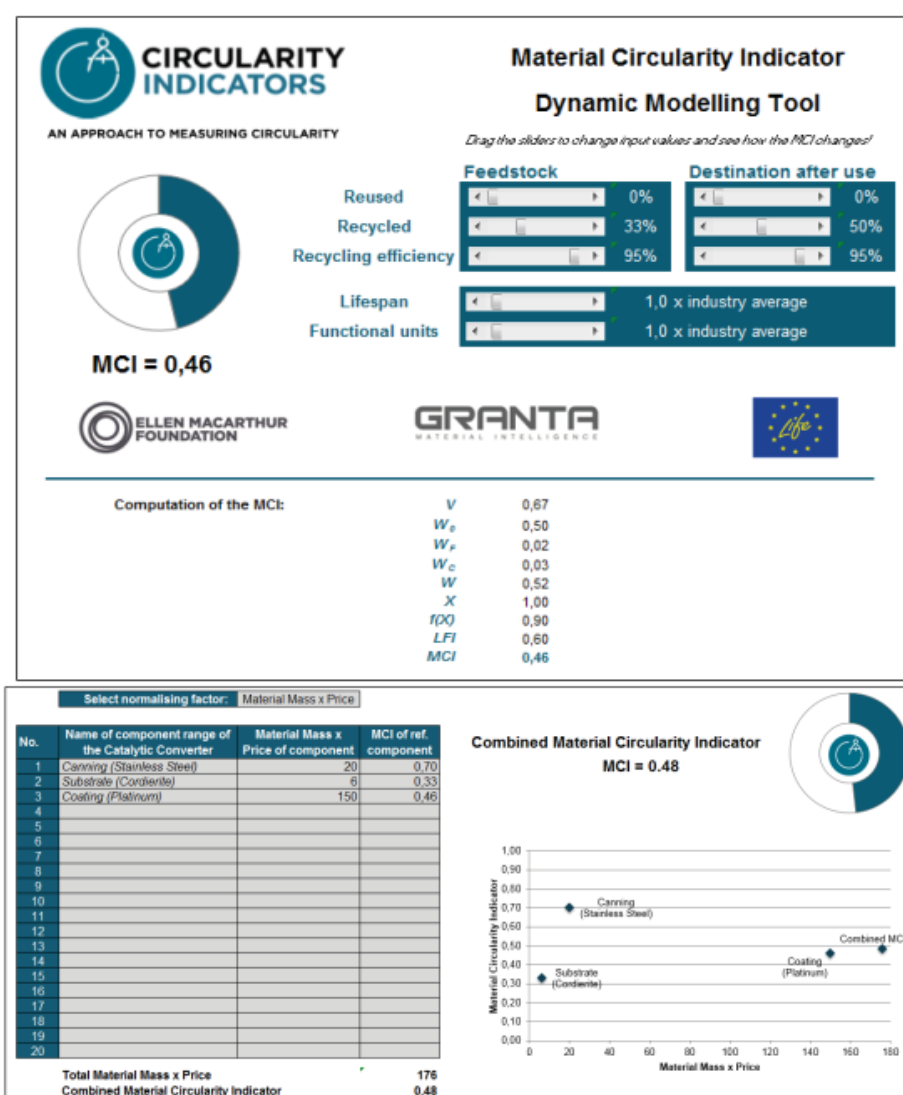


FONTE: TIOSSI (2019).

Ao final da avaliação, o resultado mensurado será um valor entre 0 e 1. Um resultado próximo a 0 corresponde a um produto pouco circular, enquanto que um

produto próximo de 1 corresponde a um produto quase completamente circular. Um produto que seja fabricado utilizando matérias-primas extraídas 100% diretamente da natureza e que ao final de sua vida útil seja encaminhado a um aterro sanitário obteria o score “0” para a ferramenta MCI. Como contraponto, a ferramenta MCI apresentaria score “1” para um produto cujas matérias-primas fossem compostas por componentes totalmente reutilizados ou reciclados, e cujo processo de reciclagem apresentasse 100% de eficiência. Pode-se ver na FIGURA 14 o formato e os campos disponíveis para serem ajustados quando da aplicação da ferramenta MCI.

FIGURA 14 - MATERIAL CIRCULARITY INDICATOR (MCI)



FONTE: SAIDANI *et al.* (2017).

Enquanto que o QUADRO 24 apresenta a lista de variáveis que fazem parte da modelagem matemática da MCI, a FIGURA 15 apresenta a representação gráfica dessas variáveis ao longo do ciclo de vida do produto avaliado.

QUADRO 24 - VARIÁVEIS QUE COMPÕEM A MODELAGEM MATEMÁTICA DO INDICADOR MCI

Símbolo	Definição
M	Massa do Produto
F_R	Parcela de massa da matéria-prima de um produto proveniente de fontes recicladas
F_U	Parcela de massa da matéria-prima de um produto proveniente de fontes reutilizadas
V	Massa de matéria-prima virgem utilizada no produto
C_R	Parcela de massa de um produto sendo coletado para entrar em um processo de reciclagem
C_V	Parcela de massa de um produto que vai para a reutilização de um componente
E_C	Eficiência do processo de reciclagem usado para a parcela de um produto coletado para reciclagem
E_F	Eficiência do processo de reciclagem usado para produzir matéria-prima reciclada para um produto
W	Massa de resíduos não recuperáveis de um determinado produto
W_0	Massa de resíduos não recuperáveis através do material de um produto que vai para o aterro, desperdício de energia e qualquer outro tipo de processo em que os materiais não são mais recuperáveis
W_C	Massa de resíduos não recuperáveis gerados no processo de reciclagem de partes de um produto
W_F	Massa de resíduos não recuperáveis gerados ao produzir matérias-primas reciclada para um produto
LFI	Índice de Fluxo Linear
F (X)	Fator Utilidade dado em função da utilidade X de um produto
X	Utilidade de um produto
L	Vida útil média de um produto
L_{av}	Vida útil média de um produto similar do mesmo segmento industrial
U	Média de unidades funcionais obtidas durante a fase de uso de um produto
U_{av}	Média de unidades funcionais obtidas por um produto similar do mesmo segmento industrial durante a fase de uso
MCI _P	Indicador de Circularidade Material de um produto
Ni	Fator de normalização usado para agregar MCIs no nível do produto usando uma abordagem de média ponderada ("i" refere-se a uma faixa
MCI _C	Indicador de Circularidade Material de uma empresa

FONTE: EMF (2015).

O Indicador de Circularidade Material (MCI) é basicamente composto por três características do produto: a massa de matéria-prima virgem usada na manufatura (V), a massa de resíduos não recuperáveis atribuídos ao produto analisado (W) e p fator de utilidade que apresenta a duração e a intensidade de uso do produto (X).

Passo 1: Estimar a quantidade de matéria-prima virgem (V)

Para um determinado produto avaliado, “F_R” representa a porcentagem de matéria-prima de origem reciclada, “F_V” representa a porcentagem de matéria-prima virgem e “M” representa a massa do produto finalizado. Com base nessas variáveis, calcula-se a massa de matéria-prima virgem “V” utilizada pelo produto por meio da expressão 1:

$$V = M (1 - F_R - F_V) \quad (1)$$

Passo 2: Estimar a quantidade de Massa Não Recuperável (W₀)

Tendo em vista que “C_R” representa o percentual de massa de um produto sendo coletado para entrar em um processo de reciclagem e “C_U” o percentual de massa de um produto que vai para a reutilização de um componente, a massa de resíduos não recuperáveis através do material de um produto que vai para o aterro, desperdício de energia e qualquer outro tipo de processo em que os materiais não são mais recuperáveis “W₀” é obtida por meio da expressão 2:

$$W_0 = M(1 - C_R - C_U) \quad (2)$$

Por sua vez, a massa de resíduos não recuperáveis gerados no processo de reciclagem de partes de um produto “W_c” é calculada com base nas variáveis “M”, “C_R” e “E_c”, a qual representa a eficiência do processo de reciclagem utilizado para reciclar o produto avaliado ao final de sua vida útil, conforme demonstra a expressão 3:

$$W_c = M (1 - E_c) C_R \quad (3)$$

Além disso, haverá ainda a massa de resíduos não recuperáveis resultante do processo de reciclagem dos componentes do produto definidos pela variável “ W_F ”, a qual deve ser calculada com base nas variáveis “ M ”, “ F_R ” e “ E_F ”, sendo esta última a eficiência do processo de reciclagem usado na reciclagem das matérias-primas. Tal conceito pode ser visto na expressão 4:

$$W_F = M \frac{(1 - E_F)F_R}{E_F} \quad (4)$$

Por fim, a massa de resíduos não recuperáveis de um determinado produto “ W ” será calculada com base nas variáveis “ W_0 ”, “ W_F ” e “ W_C ”, conforme demonstra a expressão 5 a seguir:

$$W = W_0 + \frac{W_F + W_C}{2} \quad (5)$$

Passo 3: Estimar o Índice de Fluxo Linear (LFI)

A variável “LFI”, definida pela expressão 6, calcula a porcentagem de materiais que segue o fluxo linear, ou seja, matérias-primas virgens que ao final do ciclo de vida se tornam em massa de resíduo não recuperável. Para tanto, ela considera a quantidade de material que flui de forma linear e quantidade de material que flui de forma restaurativa. Assim, a variável varia de “0” a “1”, onde “1” representa um fluxo 100% linear e “0” um fluxo 100% restaurativo.

$$LFI = \frac{V + W}{2M + \frac{W_F - W_C}{2}} \quad (6)$$

Considerando uma situação em que as eficiências dos processos de reciclagem da matéria-prima reciclada e das partes que compõem o produto sejam de 100%, tem-se $E_C = E_F = 1$. Como consequência, $W_C = W_F = 0$, já que a massa de

resíduos não recuperáveis gerados no processo de reciclagem tanto da matéria-prima reciclada quanto das partes do produto foi nula. Como consequência, expressão 6 pode ser simplificada para a forma apresentada pela expressão 7:

$$LFI = \frac{V+W}{2M} (7)$$

Passo 4: Estimar a Utilidade (X) do produto

A Utilidade (X) de um produto, definida na expressão 8, considera 2 aspectos: a extensão do tempo de vida do produto durante seu uso e a sua intensidade de uso. A primeira parte da fórmula apresenta a razão da variável “L” (Vida útil média de um produto) sobre a variável “L_{av}” (Vida útil média de um produto similar do mesmo segmento industrial). Essa divisão representa o componente da fórmula que considera a redução ou o aumento no fluxo de resíduos em função da variação do período de tempo em uso de um determinado produto. Por outro lado, a razão “U” (Média de unidades funcionais obtidas durante a fase de uso de um produto) sobre “U_{av}” (Média de unidades funcionais obtidas por um produto similar do mesmo segmento industrial durante a fase de uso) representa o componente da fórmula que considera à medida que um produto é usado em sua capacidade plena. Assim, o aumento da intensidade de uso de um determinado produto se traduz em uma maior eficiência no uso de recursos que seguiriam para um caminho de fluxo de materiais linear, o que matematicamente representa em uma pontuação maior para o indicador MCI. Da mesma forma, o aumento do tempo de vida útil de um determinado produto também representa matematicamente uma pontuação maior para o indicador MCI, contanto que neste mesmo mercado os produtos similares permaneçam com o mesmo tempo de vida útil.

$$X = \left(\frac{L}{L_{av}} \right) * \left(\frac{U}{U_{av}} \right) (8)$$

Entretanto, deve-se ressaltar que na maior parte dos estudos de caso apenas um dos componentes da fórmula é conhecido. Assim, se o componente “vida útil” for conhecido, deve-se assumir que a razão “Utilidade” será igual a 1 ($U/U_{av} = 1$). Da mesma forma, caso as unidades funcionais sejam conhecidas, a razão “Vida Útil” será igual a 1 ($L/L_{av} = 1$).

Paso 5: Estimar o Índice de Circularidade Material (MCI) do produto avaliado

Para poder calcular a variável MCI, faz-se necessário definir o Fator Utilidade $F(X)$, função essa que calcula a relação da utilidade do produto no indicador MCI. Um de seus preceitos é considerar igualmente o impacto na utilidade ocasionado tanto por uma melhora na reutilização de seus componentes, quanto no acréscimo do tempo de uso de um determinado produto, já que ambas as situações trazem como consequência a redução do uso de matérias-primas virgens e de geração de resíduos não recuperáveis. A expressão 9 define o Fator Utilidade $F(X)$ da seguinte forma:

$$F(X) = \frac{0,9}{X} \quad (9)$$

Uma vez definidas as fórmulas anteriores, pode-se enfim estimar o indicador MCI de um produto com base no Índice de Fluxo Linear (LFI) e no Fator Utilidade $F(X)$ da forma apresentada pela expressão 10 a seguir:

$$MCI_p^* = 1 - LFI * F(X) \quad (10)$$

Analisando a função Utilidade $F(X)$, percebe-se que ela pode assumir valores negativos para produtos cujos fluxos sejam quase totalmente lineares (“LFI” próximo a 1) e cuja Utilidade “X” seja pior que a média do produto ($X < 1$). Para evitar isso, os autores do indicador MCI propuseram o seguinte ajuste na expressão 11:

$$MCI_p = \max(0, MCI_p^*) \quad (11)$$

O resultado deste ajuste é que o indicador de circularidade MCI assume o valor máximo de “1” quando as variáveis “W” (Massa de resíduos não recuperáveis de um determinado produto) e “V” (Massa de matéria-prima virgem utilizada no produto) forem nulas, sem depender nesse caso da Utilidade “X”. Para todos os outros casos, a função Utilidade F (X) age penalizando produtos com vida útil curta ou com baixa utilização.

5 APLICAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE EC NO OBJETO DE ESTUDO

Por estar presente em solo brasileiro e por produzir PSF elegíveis a linhas de financiamento incentivadas, como FINAME e BNDES, foi escolhido como objeto de estudo o PSF de silício monocristalino Modelo 350M6K-36, Série 5BB, da empresa BYD. Fundada em 1995, a BYD é uma empresa especializada em energia limpa que atua globalmente fabricando baterias recarregáveis, sistemas de armazenamento de energias, ônibus e caminhões 100% elétricos. Inaugurou sua fábrica na cidade de Campinas no ano de 2015 com o objetivo de produzir ônibus elétricos e comercializar veículos e empilhadeiras elétricas. A partir de abril de 2017 passou a produzir módulos fotovoltaicos.

De acordo com a ficha técnica disponibilizada pela fabricante BYD, o PSF 350M6k-36-SÉRIE 5BB apresenta as seguintes especificações:

- Célula: Monocristalina 156,75 x 156,75 mm (6,17 polegadas);
- Número: 72 (6x12) unidades;
- Dimensão do módulo: 1960 x 990 x 35 mm (77,24 x 39,06 x 1,38 polegadas);
- Peso: 22,1 Kg (48,62 Lb);
- Vidro Frontal: Vidro temperado de 3,2 mm com revestimento de AR;
- Estrutura: Liga de alumínio anodizado;
- Caixa de junção: IP67;
- Conector: IP67;
- Diodos by-pass: 3 unidades;
- Tipo de conector: Compatível com MC4;
- Área de seção do cabo: 4 mm² (0,0062 Sq in);
- Comprimento do cabo: 2 x 1200 mm (2x 47,2 polegadas);
- Condições nominais de temperatura e funcionamento da célula (NOCT): 45°C±2°C;
- Coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito: 0,07%/°C;
- Coeficiente de temperatura da tensão de circuito aberto: -0,36%/°C;
- Coeficiente de temperatura de potência de pico: -0,38%/°C;
- Tensão de circuito Aberto (Voc): 46,0 V;
- Tensão Máxima de Funcionamento (Vmp): 38,4 V;

- Corrente de curto-circuito (I_{sc}): 9,66 A;
- Corrente de Potência de Pico (I_{mp}): 9,12 A;
- Potência Máxima em STC (W_p): 350 Wp;
- Eficiência do Módulo: 18,2%;
- Temperatura de operação: $-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$;
- Valor Nominal da Corrente Máxima do Fusível: 15 A;
- Tensão Máxima do Sistema: 1500 VCC
- Tolerância de saída de Potência: 0 ~ 5 W;
- Classe de Aplicação: Classe A.

Em razão do sigilo industrial, não foi possível obter a composição química real utilizada pela fabricante do objeto de estudo. Também não foi possível determinar o percentual de matérias-primas de segunda-mão, ou seja, oriundo de processos de reciclagem ou reuso, que a BYD utiliza atualmente no processo produtivo do PSF aqui avaliado. Assim, convencionou-se que 100% das matérias-primas utilizadas pelo objeto de estudo são de 1ª ordem, o que quer dizer que foram extraídas diretamente da natureza para o processo produtivo. Outra convenção necessária para viabilizar a aplicação das ferramentas de circularidade, diante da ausência da composição química real do objeto estudo, foi utilizar a composição química de PSFs de 1ª geração apresentada no estudo dos autores Monier e Hestin (2011), composição essa que foi mais recentemente atualizada por Dias (2015), Paiano (2015) e Ghizoni (2016). Como resultado desses estudos preliminares gerou-se o QUADRO 25 o qual serviu de orientação para a aplicação das ferramentas de circularidade CEIP, MCI e CET e do estudo de ACV.

QUADRO 25 - COMPOSIÇÃO DO PSF AVALIADO

Geração de PSF	1ª geração	
Material	Silício Monocristalino	
Fabricante	BYD	
Modelo	350M6K-36 (Série 5BB)	
Tecnologia	Silício Monocristalino	Massa (Kg)
PSF	100%	22,1000
Vidro	74,16%	16,3894

Alumínio	10,30%	2,2763
EVA	6,55%	1,4476
PVF (Tedlar)	3,60%	0,7956
Seladores (Silicone)	1,16%	0,2564
Silício	3%	0,6630
Chumbo	0,07%	0,0155
Cobre	0,57%	0,126
Estanho	0,12%	0,0265
Prata	0,006%	0,0013

FONTE: MONIER E HESTIN (2011), PAIANO (2015), DIAS (2015) E GHIZONI (2016).

Importante ressaltar que as convenções assumidas neste capítulo a fim de viabilizar a aplicação das ferramentas de circularidade foram mantidas no Capítulo 6, o qual apresenta a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) do PSF de 1ª geração M6k-36-SÉRIE 5BB da fabricante BYD. Dessa forma, objetivou-se de manter a coerência do estudo e garantir a relevância científica das conclusões obtidas da comparação dos resultados alcançados pela ACV e pelas ferramentas CET, CEIP e MCI. Os próximos tópicos deste capítulo apresentarão a aplicação das 3 ferramentas de circularidade selecionadas no objeto de estudo.

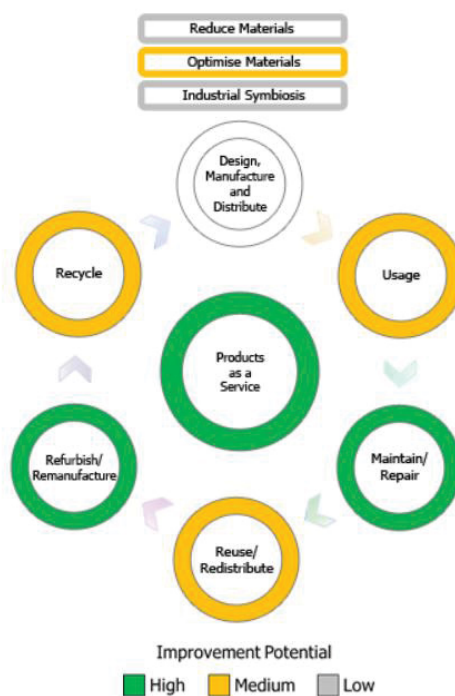
5.1 APLICAÇÃO DA FERRAMENTA CET NO OBJETO DE ESTUDO

A CET é uma ferramenta online disponível no endereço <http://circulareconomytoolkit.org/Assessmenttool.html>. Para aplicar a ferramenta, foram definidos os seguintes parâmetros:

- Ponto de vista: Fabricante (assumindo a postura de um fabricante nacional de PSF);
- Produto: PSF de 1ª geração de silício monocristalino;
- Uso: Simulação com seriedade (ao contrário da simulação sem compromisso, também oferecida pela ferramenta).

Os resultados das avaliações podem ser vistos na FIGURA 15 e nos Quadros 26 e 27 e serão discutidos e interpretados na sequência.

FIGURA 15 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA CET NO OBJETO DO ESTUDO



FONTE: O autor (2019).

QUADRO 26 - ÁREA DE MELHORIA X POTENCIAL DE MELHORIA

Área de Melhoria	Potencial de Melhoria
Redução de materiais	Baixo
Otimizar materiais	Médio
Simbiose Industrial	Baixo
Uso	Médio
Preservação ou Reparo	Alto
Reuso ou Redistribuição	Médio
Reforma ou Remanufatura	Alto
Reciclagem	Médio
Produto como Serviço	Alto

FONTE: O autor (2019).

QUADRO 27 - RESULTADO DA CET SOBRE O OBJETO DE ESTUDO

#	1.Projeto, Manufatura e Distribuição	Baixo	Médio	Alto	
1	Sem materiais usados em excesso	X			Alto desperdício de materiais
2	Produto é totalmente desmaterializável	X			Pode ser reduzido através do redesign do processo
3	100% biodegradável		X		Alto percentual de materiais não biodegradáveis

4	100% materiais provenientes de reciclagem	X			Alto percentual de matérias-primas in natura; Presença de materiais não recicláveis
5	Ausência de materiais escassos no produto			X	Produto contém materiais escassos: Antimônio, Cobalto, Gálio, Germânio, Índio, Platina, Paládio, Nióbio, Neodímio e Tântalo.
6	Materiais eco-eficientes (baixo consumo de energia e baixa emissão de carbono na produção)		X		Materiais usados tem baixa eficiência ecológica
7	Ausência de materiais tóxicos no produto		X		Excesso de produtos tóxicos no produto
8	Zero resíduos na fabricação	X			Excesso de resíduos gerados na fabricação
9	100% dos resíduos são usados como insumos em outros processos produtivos	X			Quantidade significativa de resíduo é destinada a Aterros Sanitários
#	2.Uso (Pelo Consumidor)	Baixo	Médio	Alto	
10	Falhas do produto raramente ocorrem	X			Falhas do produto são frequentes
11	Produto com ciclo de vida longo	X			Produto com ciclo de vida curto
12	Produto não necessita ou faz baixo uso de energia elétrica		X		Produto desperdiça energia elétrica e gera resíduos
#	3.Preservar ou Reparar o produto	Baixo	Médio	Alto	
13	Custo de reparar o produto supera o custo de aquisição de um novo produto			X	Custo de reparo é baixo quando comparado a um produto novo
14	Serviço de reparo e manutenção são oferecidos (Diagnóstico, substituição de componentes, Suporte técnico, Instalação, Garantia)	X			Produto sem serviço de reparo ou manutenção
15	Dificuldade em acessar o funcionamento interno			X	Facilidade em acessar o funcionamento interno
16	Funcionamento complexo, de difícil compreensão			X	Funcionamento simples, de fácil compreensão
17	Não há padronização de componentes, conectores, módulos e dispositivos			X	Componentes, conectores, módulos e dispositivos são padronizados

18	Diagnóstico trabalhoso		X		Diagnóstico fácil
#	4.Reusar ou Redistribuir	Baixo	Médio	Alto	
19	Não há mercado de segunda-mão			X	Existe um mercado de segunda-mão
20	São oferecidas vendas de produtos de segunda-mão	X			Não são oferecidas vendas de produtos de segunda-mão
21	Produto apresenta ciclo de vida bem estendido	X			Produto apresenta ciclo de vida bem curto
#	5.Reformar ou Remanufaturar	Baixo	Médio	Alto	
22	Remanufatura/Conserto de alto custo		X		Remanufatura/Conserto de baixo custo
23	Alto custo para coletar o produto e encaminhá-lo para o fabricante		X		Baixo custo para coletar o produto e encaminhá-lo para o fabricante
24	Todos os produtos são consertados e remanufaturados		X		Nenhum produto é consertado ou remanufaturado
25	Desmontagem trabalhosa		X		Desmontagem simples
26	Danos significativos causados ao produto ou aos seus componentes durante a desmontagem		X		Sem danos significativos ao produto ou aos seus componentes durante a desmontagem
27	Impossível identificar os componentes após a desmontagem				Componentes são identificados com facilidade após a desmontagem
28	Não há partes modulares que permitam fácil substituição			X	Produto com partes modulares que permitam fácil substituição
29	Impossível fazer upgrade de componentes			X	Possibilidade de fazer upgrade de componentes
30	Muitas componentes e processos mecânicos (Soldas, parafusos e rebites)	X			Poucos componentes e processos mecânicos (Soldas, parafusos e rebites)
31	Muitas ferramentas são necessárias para a desmontagem	X			Poucas ferramentas são necessárias para a desmontagem
#	6.Produto como um Serviço	Baixo	Médio	Alto	
32	Não há Mercado para comercializar o produto como um serviço	X			Bom mercado para vender os produtos como um serviço
33	Todos os produtos já são comercializados como serviço			X	Nenhum produto é comercializado como serviço
#		Baixo	Médio	Alto	

	7. Reciclar produto ao atingir o fim da vida útil				
34	Produto é formado por poucos materiais distintos			X	Produto é formado por muitos materiais distintos
35	Materiais são facilmente separados na reciclagem	X			Materiais oferecem dificuldade para serem separados na reciclagem

FONTE: O autor (2019).

O resultado da aplicação da ferramenta CET sobre o objeto de estudo evidenciou que dos 35 pontos de avaliação propostos pela ferramenta, 14 itens obtiveram resultado “Baixo”, “10” itens apresentaram resultado “Médio” e 11 itens resultaram na resposta “Alto”. Sabendo que essas respostas são em função do potencial de melhoria do ponto de vista circular do produto avaliado, numa análise direta compreende-se que 40% dos itens já atingiram o potencial máximo. De forma lógica compreende-se 60% dos itens ainda podem ser vistos como oportunidades a serem exploradas para tornar o produto ainda mais circular.

Sobre os itens que apresentaram alto potencial de melhoria, destaca-se os que denunciam o uso de matérias-primas escassas (no caso, metais preciosos), a dificuldade em se obter peças para reposição, a inexistência de um mercado estabelecido capaz de absorver PSFs de segunda mão, ao número reduzido de assistências técnicas especializadas e ao alto custo de reparo.

5.2 APLICAÇÃO DA FERRAMENTA CEIP NO OBJETO DE ESTUDO

O resultado da aplicação da ferramenta CEIP de Cayzer *et al.* (2017) no PSF M6k-36-SÉRIE 5BB da fabricante BYD pode ser conferido a seguir no QUADRO 28.

QUADRO 28 - RESULTADO DA CEIP SOBRE O OBJETO DE ESTUDO

Estágio de Ciclo de Vida	#	Questão	Variável avaliada	Pontuação	Pontuação Máxima	Percentual	Classificação
--------------------------	---	---------	-------------------	-----------	------------------	------------	---------------

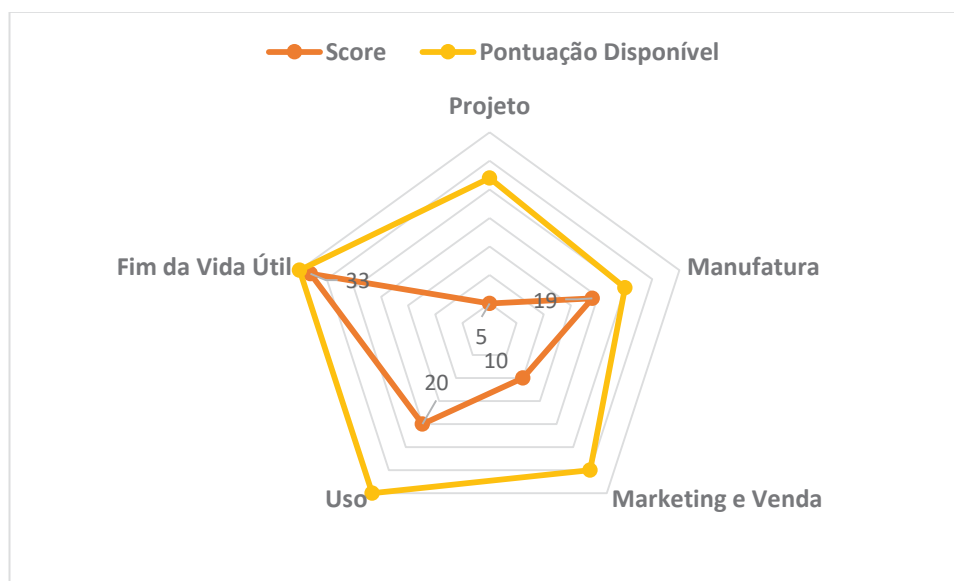
Projeto	1	O produto é feito de materiais reciclados ou reutilizados?	Uso de materiais	0	20	18,5%	Ruim
	2	O novo produto é mais leve que seu antecessor?	Desmaterialização	0	2		
	3	O produto apresenta uma lista completa de materiais e substâncias?	Lista de Materiais	5	5		
Manufatura	4	Há uma lista completa de gasto energético do processo produtivo?	Gestão energética	9	10	76%	Excelente
	5	Há uma lista completa de resíduos sólidos do processo produtivo?	Gestão de resíduos	10	15		
Marketing e venda	6	Quais embalagens estão sendo utilizadas?	Embalagem / Acondicionamento	0	5	33,3%	Razoável
	7	Qual é o tempo de garantia do produto?	Garantia do produto	10	10		
	8	O produto pode ser alugado ao invés de adquirido?	Serviço de locação	0	15		
Uso	9	É possível reconhecer o estado do produto antes de uma possível falha?	Estado do produto	0	15	57,1%	Bom
	10	Existe serviço de reparo para o produto?	Serviço de reparo	5	5		
	11	O produto pode ser reutilizado em mercado de segunda mão?	Possibilidade de reuso	10	10		

	12	O uso deste produto implica na redução de consumo de outros produtos ou na geração de resíduos?	Redução de resíduos	5	5		
Fim da Vida Útil	13	O produto apresenta possibilidade de ser reaproveitado?	Recuperação do produto: Esquema de retorno	14	15	94%	Excelente
	14	O produto pode ser desmontado? Suas partes podem ser reaproveitadas?	Recuperação do produto: Separação	10	10		
	15	Os materiais que compõem o produto podem ser reinseridos em processos produtivos?	Recuperação do produto: Reuso ou Reciclagem	9	10		
Pontuação Total				87	152	57,2%	BOM

FONTE: O autor (2019).

Apesar dos esforços em obter a planilha de Microsoft Office Excel original utilizada por Cayzer *et al.* (2017) na pesquisa que resultou na divulgação da ferramenta CEIP, não foi possível localizar a planilha. Tentou-se contatar os autores do estudo por correio eletrônico, no entanto até o momento não houve resposta dos autores. De toda forma a ferramenta pode ser aplicada com sucesso, uma vez que o estudo publicado por Cayzer *et al.* (2017) apresenta as 15 questões e suas respectivas pontuações junto de um estudo de caso, o qual orienta como usar a ferramenta. O GRÁFICO 2 apresenta a representação gráfica da CEIP aplicada ao objeto de estudo.

GRÁFICO 2 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA CEIP NO OBJETO DO ESTUDO



FONTE: O autor (2019).

5.3 APLICAÇÃO DA FERRAMENTA MCI NO OBJETO DE ESTUDO

Nesta seção será apresentado o resultado da aplicação da ferramenta MCI desenvolvida pela EMF (2015) para o painel solar fotovoltaico modelo M6k-36-SÉRIE 5BB da fabricante BYD.

A Fundação Ellen MacArthur disponibiliza em seu *website* uma planilha de Microsoft Excel capaz de calcular o indicador MCI para o objeto de estudo que se deseja estudar, bastando para tanto atribuir valores aos 8 campos permissíveis de edição segmentados em 3 grupos de indicadores. O primeiro grupo, “matéria-prima”, apresenta três variáveis que podem ser alteradas:

1. Percentual de matéria-prima oriunda de reuso;
2. Percentual de matéria-prima oriunda de reciclagem;
3. Percentual de eficiência do processo de reciclagem da matéria-prima de origem reciclável.

Ao utilizar a ferramenta pode-se notar que essas três variáveis podem variar de 0% a 100%. Nota-se também que o somatório de percentuais referentes a matérias-primas de origem reciclada e de reuso podem assumir no máximo 100%. Assim, caso seja atribuído o valor de 60% para o percentual de reuso, o percentual máximo admissível para a matéria-prima de origem reciclada será de 40%.

O segundo grupo, “Destinação após o uso”, da mesma forma que o primeiro grupo, apresenta três variáveis alteráveis:

1. Percentual do produto que será destinado ao reuso;
2. Percentual do produto que será destinado à reciclagem;
3. Percentual de eficiência do processo de reciclagem da parcela do produto destinada à reciclagem.

Tal qual o primeiro grupo, os indicadores deste segundo grupo também variam de 0% a 100% e o somatório do percentual do produto destinado ao reuso e à reciclagem também estão limitados a 100%. Assim, ao final da vida útil do produto avaliado, e 30% de seu material for encaminhado à reciclagem, o reuso máximo possível será sobre os 70% restantes do produto.

O terceiro grupo de indicadores é composto por duas variáveis:

1. Vida Útil;
2. Intensidade de Uso (Unidades Funcionais).

Essas duas variáveis não são medidas em termos percentuais, e sim em valores unitários. A primeira avalia a vida útil do produto avaliado em relação aos seus concorrentes similares no mercado. Caso o produto apresente uma vida útil igual aos seus concorrentes, deve-se atribuir o valor “1” para este campo. A segunda variável avaliada, “Intensidade de Uso”, diz respeito à forma como o produto avaliado pretende ser utilizado, ou seja, avalia a extensão que o produto avaliado será utilizado em relação a sua capacidade total de uso.

Na etapa de revisão de literatura, autores como Fthenakis (2000), Latunussa *et al.* (2016) e (Brenner e Abramovic, 2017) apontam ser possível reutilizar cerca de 90% de seus materiais em novos módulos solares. De acordo com os estudos de Monier e Heston (2011), Kang *et al.* (2012) e Paiano (2015), é possível recuperar dos painéis solares fotovoltaicos: 95% de vidro, 100% de alumínio, de 76% até 86% de silício, de 80% até 95% do telúrio, de 78% até 100% do cobre, de 30% a 50% da prata e, por fim, de 20% até 40% dos metais nobres Índio, Gálio e Germânio. No caso dos polímeros Acetato de Vinila (EVA), Fluoreto de Polivinila (Tedlar ou PFV) e Silicone, os quais representam respectivamente 6,55%, 3,6% e 1,16% do PSF avaliado, esses são separados dos demais componentes por meio de solventes orgânicos ou por decomposição térmica (pirólise a aproximadamente 500°C). Apesar desses polímeros

não terem seus materiais recuperados, eles não precisam ser encaminhados para aterros sanitários, já que de acordo com os autores eles podem ser incinerados com o objetivo de gerar energia elétrica. Aplicando esses valores sobre o objeto alvo deste estudo, o PSF modelo 350M6k-36-SÉRIE 5BB da fabricante BYD, o qual apresenta sua composição no QUADRO 25 do Capítulo 5, chega-se ao QUADRO 29:

QUADRO 29 - TAXA DE RECUPERAÇÃO DOS COMPONENTES DO PSF 350M6k-36-SÉRIE 5BB DA FABRICANTE BYD

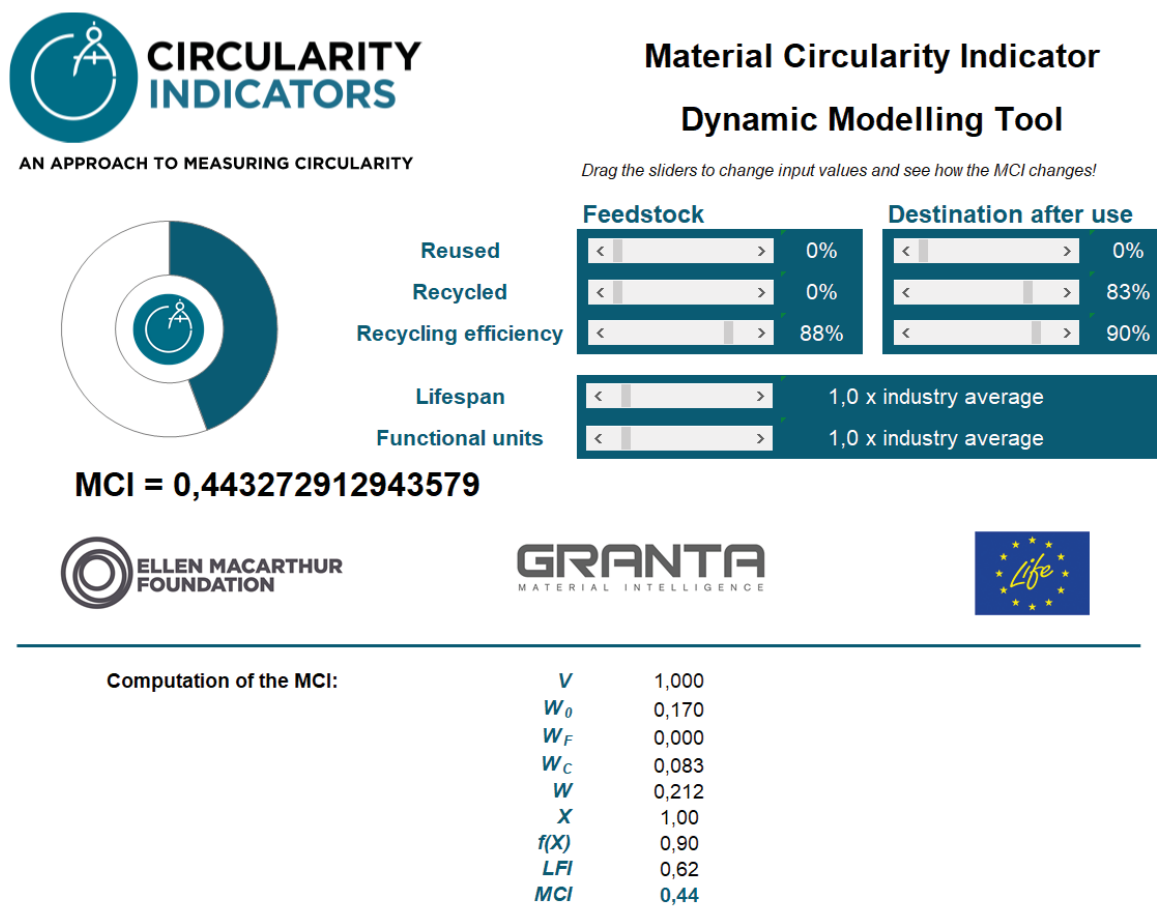
Tecnologia	Silício Monocristalino	Massa (Kg)	Taxa de Recuperação	Massa Recuperada (Kg)	Autores
PSF	100%	22,1000	83,7%	18,4959	Monier e Heston, 2011 Kang <i>et al.</i> , 2012 Paiano, 2015
Vidro	74,16%	16,3894	95%	15,5699	
Alumínio	10,30%	2,2763	100%	2,2763	
Acetato de vinila (EVA)	6,55%	1,4476	0%	0,0000	
Fluoreto de Polivinila (Tedlar ou PFV)	3,60%	0,7956	0%	0,0000	
Seladores (Silicone)	1,16%	0,2564	0%	0,0000	
Silício	3%	0,6630	81%	0,5370	
Chumbo	0,07%	0,0155	0%	0,0000	
Cobre	0,57%	0,126	89%	0,1121	
Estanho	0,12%	0,0265	0	0,0000	
Prata	0,006%	0,0013	40%	0,0005	

FONTE: MONIER e HESTON (2011); KANG ET EL (2012); PAIANO (2015); DIAS (2015); GHIZONI (2016).

Com base no QUADRO 29, foram atribuídos os seguintes valores na planilha de Microsoft Office Excel para calcular a MCI do objeto de estudo. O MCI calculado é apresentado na FIGURA 16:

- Percentual de matéria-prima oriunda de reuso: Zero (não informado pelo fabricante)
- Percentual de matéria-prima oriunda de reciclagem: Zero (não informado pelo fabricante)
- Percentual de eficiência do processo de reciclagem da matéria-prima de origem reciclável: 88%, com base em Monier e Heston (2011), Kang *et al.* (2012) e Paiano (2015);
- Percentual do produto que será destinado ao reuso: 0%, com base em Fthenakis (2000), Latunussa *et al.* (2016) e (Brenner e Abramovic, 2017)
- Percentual do produto que será destinado à reciclagem: 83%;
- Percentual de eficiência do processo de reciclagem da parcela do produto destinada à reciclagem: 90%, com base em Monier e Heston (2011), Kang *et al.* (2012) e Paiano (2015);
- Vida Útil: 1
- Intensidade de Uso (Unidades Funcionais): 1

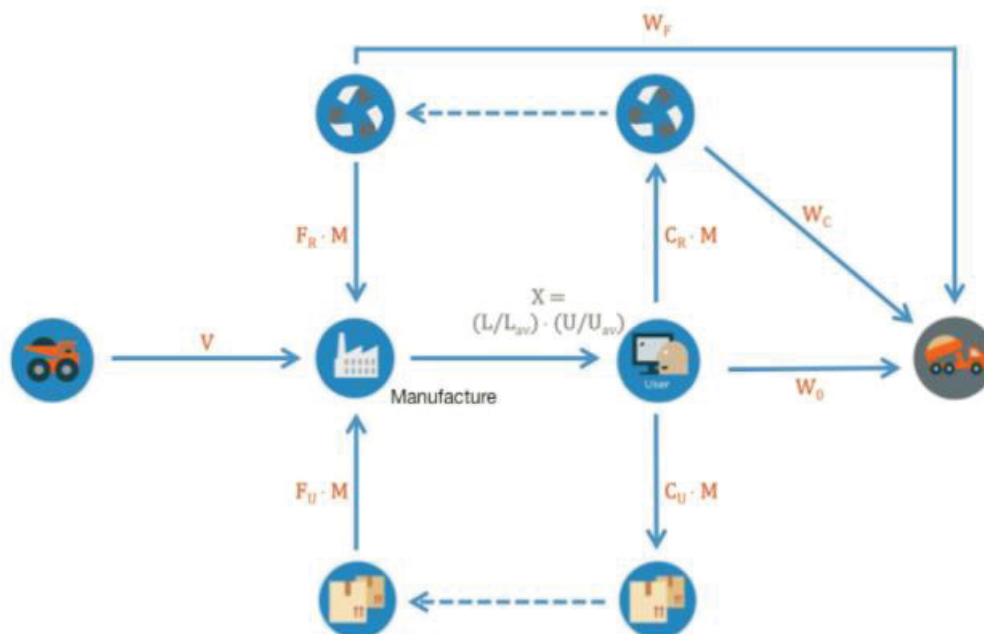
FIGURA 16 - MCI CALCULADO PARA O PSF M6k-36-SÉRIE 5BB DA FABRICANTE BYD



FONTE: O autor (2019).

A FIGURA 16 apresenta os valores calculados para cada uma das variáveis que compõem o indicador MCI. Para compreender melhor os resultados das variáveis, a seguir, na FIGURA 17, é apresentada a representação gráfica da modelagem matemática do indicador MCI.

FIGURA 17 - MODELAGEM MATEMÁTICA DO INDICADOR MCI



FONTE: EMF (2015).

5.4 ANÁLISE COMPARATIVA DAS FERRAMENTAS CET, CEIP E MCI

Apesar da ferramenta CET apresentar 35 perguntas a serem respondidas, ou seja, 18 questões a mais que a ferramenta CEIP, esta última mostrou-se tão abrangente no que diz respeito a cobrir todos os aspectos da EC do que a primeira. Isso porque as 15 questões, as quais são segmentadas em 5 estágios da Economia Circular, mostraram-se plenamente suficientes para abranger todos os aspectos da EC definidos pela Ellen MacArthur Foundation. Outro ponto destacável da CEIP diz respeito ao seu perfil de avaliação quali-quantitativo. Ao mesmo tempo em que fornece resultados quantitativos expressos em valores absolutos que variam de 0 a 152 pontos, cada um dos 5 estágios é avaliado qualitativamente, podendo apresentar as seguintes respostas: Ruim, Razoável, Bom e Excelente.

Por outro lado, uma vantagem da CET em relação à CEIP diz respeito à possibilidade de se variar o perfil do avaliador. Enquanto a CEIP tem como foco os fabricantes, a CET permite assumir 5 perfis distintos de usuários: fabricante, distribuidor, vendedor, comprador e consumidor.

A ausência de informações sobre a origem das matérias-primas afetou diretamente o resultado mensurado tanto pela ferramenta qualitativa, a CET, quanto

as ferramentas quantitativas, CEIP e MCI. Em função do sigilo industrial, não foi possível obter da fabricante BYD o percentual de matérias-primas originado da reciclagem e do reuso. Como consequência, foi necessário considerar que 100% das matérias-primas são in natura, ou seja, que foram extraídas diretamente da natureza.

Ao comparar os percentuais mensurados pelas duas ferramentas quantitativas, observou-se que a CEIP atingiu um score de 57,2%, enquanto que a MCI atingiu um score de 44,32%. O que justifica a CEIP enxergar o mesmo produto, avaliado sobre as mesmas condições, com um maior valor de circularidade em relação a MCI é o fato da ferramenta CEIP de Cayzer *et al.* (2017) ser menos sensível que a ferramenta da Fundação Ellen MacArthur à ausência de matérias-primas recicladas ou oriundas de reuso. Ao analisar exclusivamente a CEIP, ao longo dos seus 5 grupos de avaliação (Projeto, Manufatura, Marketing e Venda, Uso e Fim da Vida Útil) nota-se que os grupos “Projeto” e “Marketing e Venda” foram os que apresentaram resultados mais baixos. Isso ocorreu em função da já mencionada ausência de informações sobre a origem das matérias-primas, o que fez com que se convencionasse que elas eram 100% de origem in natura, e também por mais dois motivos: a ausência de informação das embalagens utilizadas no fornecimento do PSF ao consumidor final e a ausência da disponibilização do produto como um serviço. Até o momento a fabricante BYD apenas fabrica e comercializa seus PSFs, não havendo no momento a possibilidade de contratar deste fabricante o serviço de locação de seus painéis solares. Por outro lado, o grupo “Fim da Vida Útil” elevou o resultado final por considerar de forma muito positiva a capacidade do PSF ser desmontável e por seus componentes apresentarem a capacidade de serem recuperados pelos mais variados processos produtivos, seja mediante a reciclagem, o reuso ou o reaproveitamento.

A respeito do indicador MCI da Fundação Ellen MacArthur, nota-se claramente como seu score foi impactado pela convenção adotada sobre a origem das matérias-primas. Também deve-se considerar que, diferente da CEIP, a MCI valoriza mais o potencial de reuso do que o potencial de reciclagem, tanto ao ponderar o impacto da origem das matérias-primas quanto da destinação final dos resíduos gerados após o fim da vida útil. Essa compreensão é coerente com o diagrama de borboleta da EC criado por essa mesma fundação, o qual pode ser visto na FIGURA 19. De acordo com este diagrama, deve-se priorizar pelos fluxos menores. Assim, a hierarquia de soluções de economia circular deveria seguir a seguinte ordem:

- i. Compartilhar;
- ii. Manter e Prolongar;
- iii. Reutilizar e Redistribuir;
- iv. Renovar e Remanufaturar;
- v. Reciclar.

6 ACV SIMPLIFICADA DO PSF

Neste capítulo foi apresentada a avaliação de ciclo de vida simplificada desenvolvida para o painel solar fotovoltaico de silício monocristalino 350M6K-36-SÉRIE-5BB fabricada pela empresa BYD.

6.1 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E DO ESCOPO

As etapas que integram um estudo de ACV já foram definidas na seção 2.3 do capítulo de Revisão de Literatura.

- Aplicação pretendida: avaliar os impactos ambientais gerados pelo painel solar fotovoltaico de silício monocristalino 350M6K-36-SÉRIE-5BB fabricado pela empresa BYD;
- Razões para a realização deste estudo: identificar a melhor solução ambiental, entre as cadastradas no software Simapro;
- Público-alvo: comunidade acadêmica e fabricantes de PSFs no Brasil;

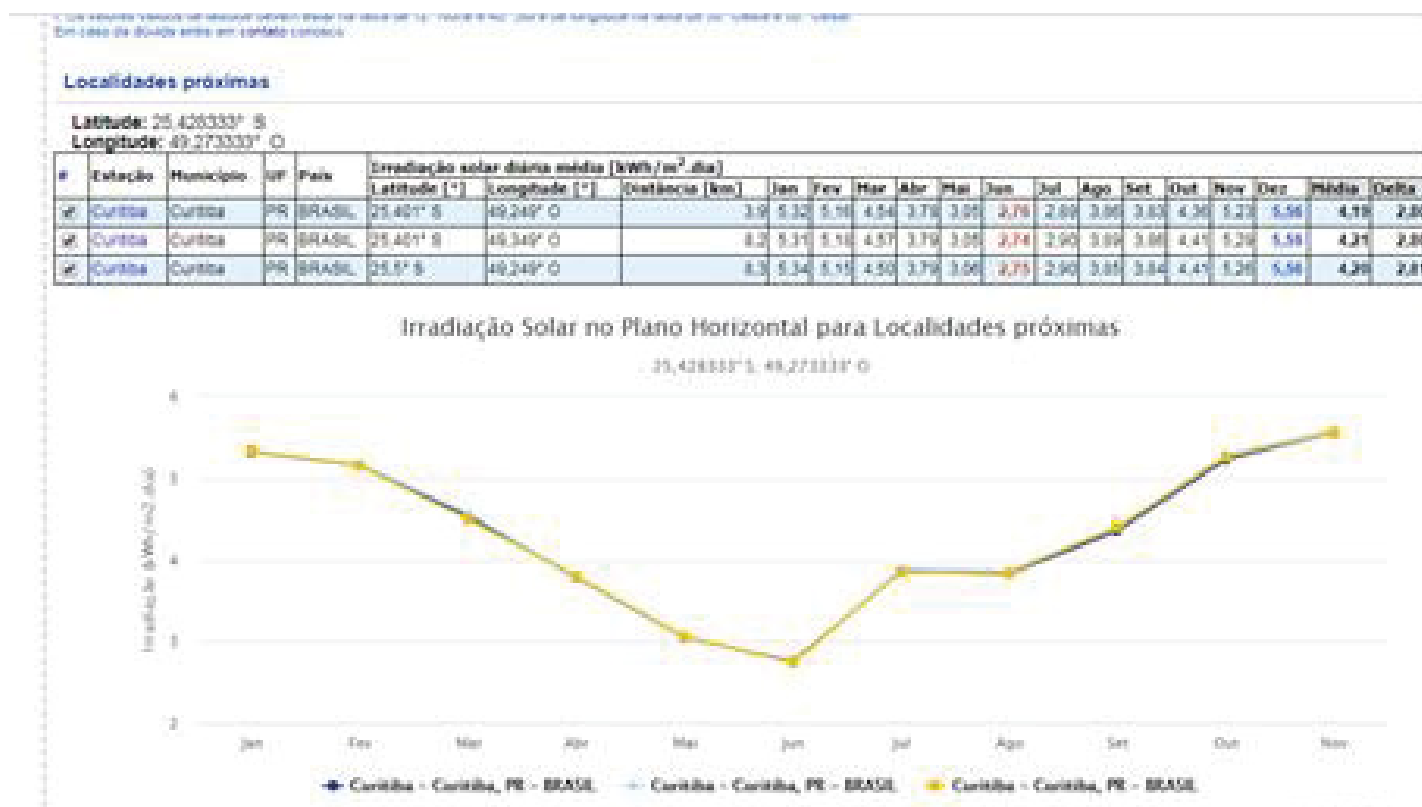
Seguindo o passo a passo necessário para se desenvolver um estudo de ACV, definiu-se os seguintes critérios:

- Unidade Funcional: Gerar 10.946,322 kW.h ao longo de 25 anos;
- Fluxo de Referência: 1 PSF;
- Função: gerar energia elétrica;
- Abordagem de ciclo de vida: Berço ao túmulo (desde a extração da matéria-prima até a destinação final);
- Sistema: PSF 350M6k-36-SÉRIE 5BB da fabricante BYD, fabricado e comercializado no Brasil;
- Limite: PSF de 1ª geração confeccionado em silício monocristalino;
- Inventário de Ciclo de Vida: Ecoinvent (versão 3.5);
- Método de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida: IMPACT2002+ (versão 2.14)

- Software: SimaPro 9.0.0, da fabricante holandesa Pre-Consultants.

Neste ponto, faz-se necessário esclarecer a memória de cálculo utilizada para quantificar a produção energética esperada ao longo de 25 anos pelo PSF avaliado. De acordo com a especificação técnica do fabricante, o PSF 350M6K-36-SÉRIE-5BB fabricado pela empresa BYD apresenta potência máxima de 350 Wp e um módulo com eficiência de 18,2% (BYD, 2019). Além disso, de acordo com o Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB) o tempo solar por dia para a cidade de Curitiba é de 4,19h, conforme se pode ver na FIGURA 18. (CRESESB, 2019).

FIGURA 18 - IRRADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA PARA A CIDADE DE CURITIBA



FONTE: CRESEB (2019).

- Energia gerada = Potência x Horas de Irradiação Solar x Eficiência do PSF
- Energia (Dia) = 350 Wp x 4,19 h x 0,818 = 1199,59 W.h
- Energia (Anual) = Energia (dia) x 365 = 437852,9 W.h
- Energia (vida total – 25 anos) = Energia (Anual) x 25 = 10946,322 kW.h

Assim, os dados inventariados do PSF e também a sua estimativa de uso (produção de energia ao longo da vida útil de 25 anos) foram dados primários. O restante, tipo extensão de ciclo até extração de matéria prima, e para cenário de descarte, foram dados secundários, da base de dados do software Simapro.

6.2 ANÁLISE DO INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA

O cadastro do PSF avaliado no software Simapro iniciou pelas Fases do Produto, sendo a “Montagem” a primeira fase preenchida. A FIGURA 19 mostra como foram cadastrados os componentes químicos que compõem o PSF avaliado com suas respectivas quantidades em quilogramas, informações essas já apresentadas no QUADRO 28 do Capítulo 5.

FIGURA 19 - FASE DE MONTAGEM NO SOFTWARE SIMAPRO

Documentação	Sub-compartimento	Parâmetros	Resultado do inventário					
Saídas conhecidas para a esfera tecnológica. Produtos e co-produtos		Quantidade	Unidade	Grandeza	Alocação	Tipo de residi.	Categoria	Comentário
PSF		22.1	kg	Mass	100 %	não definido	Others	
(Insira linha aqui)								
Saídas conhecidas para a esfera tecnológica. Produtos evitados		Quantidade	Unidade	Distribuição	SD*2 eller 2 Min	Máx	Comentário	
(Insira linha aqui)								
Entradas								
Entradas conhecidas da natureza (recursos)		Sub-compartimento	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD*2 eller 2 Min	Máx	Comentário
(Insira linha aqui)								
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (materiais/combustíveis)			Quantidade	Unidade	Distribuição	SD*2 eller 2 Min	Máx	Comentário
Aluminium alloy, Al/Li (GLO) market for Cut-off, U			2,2763	kg	Indefinido			
Ethylvinylacetate, foil (GLO) market for Cut-off, U			1,4776	kg	Indefinido			
Wire drawing, copper (GLO) market for Cut-off, U			0,126	kg	Indefinido			
Lead (GLO) market for Cut-off, U			0,0155	kg	Indefinido			
Silver (GLO) market for Cut-off, U			0,0013	kg	Indefinido			
Tin (GLO) market for Cut-off, U			0,0265	kg	Indefinido			
Silicone product (GLO) market for APOS, U			0,2564	kg	Indefinido			
Silicon, multi-si, casted (RoW) market for silicon, multi-Si, casted Cut-off			0,663	kg	Indefinido			
Flat glass, uncoated (GLO) market for Cut-off, U			16,3894	kg	Indefinido			
Polyvinylfluoride (GLO) market for Cut-off, U			0,7956	kg	Indefinido			
(Insira linha aqui)								
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (eletricidade/calor)			Quantidade	Unidade	Distribuição	SD*2 eller 2 Min	Máx	Comentário

FONTE: O autor (2019).

A fase “Ciclo de Vida”, disponível na FIGURA 20, foi a segunda a ser cadastrada. De acordo com as especificações técnicas do fabricante, o PSF avaliado produzindo mínimo 35,98 kWh por mês. Projetando seu uso ao longo dos 25 anos de vida útil informados pela empresa BYD, conclui-se que ao longo desse período serão gerados 10.946,32 kWh por esse único painel solar. Neste ponto resta esclarecer que

estão fora do escopo deste estudo os inversores, as baterias, os módulos e as estruturas metálicas que servem de apoio.

FIGURA 20 - FASE DE CICLO DE VIDA NO SOFTWARE SIMAPRO

Nome	Estado	Comentário
Montagem PSF	Nenhum	

Materials/Montagens	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2	e/ou 2 Min	Máx	Comentário
PSF	22,1	kg	Indefinido				
(Insira linha aqui)							

Processos	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2	e/ou 2 Min	Máx	Comentário
(Insira linha aqui)							

Image

Arquivo Editar Calcular Ferramentas Janela Ajuda

Entrada/saída Parâmetros

Nome	Estado	Comentário
CV PSF	Nenhum	

Montagem	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2	e/ou 2 Min	Máx	Comentário
Montagem PSF	1	p	Indefinido				

Processos	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2	e/ou 2 Min	Máx	Comentário
Eletricidade produzida	10946,322	kWh	Indefinido				
(Insira linha aqui)							

Cenário de destino final/resíduos

Cenário final resíduos

Comentário

Ciclos de vida adicionais	Número	Distribuição	SD^2	e/ou 2 Min	Máx	Comentário
(Insira linha aqui)						

FONTE: O autor (2019).

As duas figuras abaixo representam o Processo “Eletricidade produzida”. Este processo foi montado para simular a energia produzida pelo PSF, cuja referência inicial é de 1 kWh. No entanto, é fundamental esclarecer que esta referência é alterada para o proporcional da produção ao longo da vida quando da junção dos dados que são apresentados na FIGURA 20.

Na FIGURA 21 nota-se que este processo denominado “Eletricidade produzida”, a produção de 1 kW.h requer certa quantidade de energia solar e de água para resfriamento do PSF. Também são consumidas nesse processo água na forma de vapor e água para tratamento de efluente (*waste water*). Por fim, uma observa-se

que a saída evitada “*Electricity, low voltage*” representa ao se gerar 1 kW.h de energia solar, deixa-se de usar 1 kW.h de Eletricidade da rede brasileira.

FIGURA 21 - PROCESSO ENERGIA PRODUZIDA

Documentação | **Entrada/saída** | Parâmetros | [Descrição do sistema]

Produtos

Saídas conhecidas para a esfera tecnológica. Produtos e co-produtos	Quantidade	Unidade	Grandeza	Alocação	Categoria	Comentário
Eletricidade produzida	1	kWh	Energy	100 %	Ele., Transformation	Production Volume Amount: 0
(Insira linha aqui)						

Saídas conhecidas para a esfera tecnológica. Produtos evitados	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD*2 eller 2 Min	Máx	Comentário
Electricity, low voltage (BR) market for Cut-off, U	1	kWh	Indefinido			
(Insira linha aqui)						

Entradas

Entradas conhecidas da natureza (recursos)	Sub-compartimento	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD*2 eller 2 Min	Máx	Comentário
Energy, solar, converted	in air	3,8503	MJ	Sessão nom	1,0713		(2.2.1.1.1,na) Energy loss in the system is included.
(Insira linha aqui)							

Entradas conhecidas da esfera tecnológica (materiais/combustíveis)	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD*2 eller 2 Min	Máx	Comentário
Tap water (RoW) market for Cut-off, U	0,0051180865	kg	Sessão nom	1,1267		(2.2.1.5.1,na) Calculated value. Amount of installation nee produce 1 kWh * panel area per installation need to clean 1 m2 of panel. [unit/kWh * m2 /m2 = (kWh). A density of 1 kg/dm3 is ass
(Insira linha aqui)						

Entradas conhecidas da esfera tecnológica (electricidade/calor)	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD*2 eller 2 Min	Máx	Comentário
(Insira linha aqui)						

Arquivo | Editar | Calcular | Ferramentas | Janela | Ajuda

Documentação | **Entrada/saída** | Parâmetros | [Descrição do sistema]

Emissões para o ar	Sub-compartimento	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD*2 eller 2 Min	Máx	Comentário
Water/m3		7,6771297956	m3	Sessão nom	1,4918		(4.4.3.2.4,na) Calculated value based on literature values . expert opinion. See comments in the param comment field.
(Insira linha aqui)							

Emissões para a água	Sub-compartimento	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD*2 eller 2 Min	Máx	Comentário
(Insira linha aqui)							

Emissões para o solo	Sub-compartimento	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD*2 eller 2 Min	Máx	Comentário
(Insira linha aqui)							

Fluxos finais de resíduo	Sub-compartimento	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD*2 eller 2 Min	Máx	Comentário
(Insira linha aqui)							

Emissões não materiais	Sub-compartimento	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD*2 eller 2 Min	Máx	Comentário
(Insira linha aqui)							

Questões sociais	Sub-compartimento	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD*2 eller 2 Min	Máx	Comentário
(Insira linha aqui)							

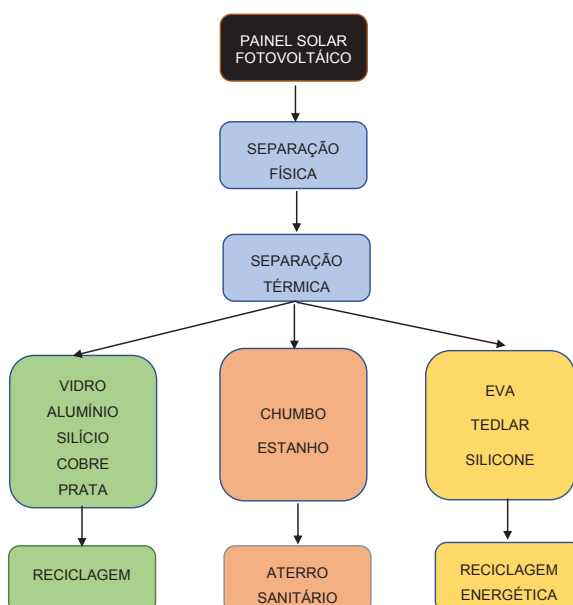
Questões econômicas	Sub-compartimento	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD*2 eller 2 Min	Máx	Comentário
(Insira linha aqui)							

Saídas conhecidas para a esfera tecnológica. Resíduos e emissões para tra	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD*2 eller 2 Min	Máx	Comentário
Wastewater, from residence (RoW) market for wastewater, from residence	5,1180865304	m3	Sessão nom	1,1267		(2.2.1.5.1,na) Calculated value. Production Volume Amount: 0
(Insira linha aqui)						

FONTE: O autor (2019).

Na terceira fase cadastrada foi a de “Cenários de Destino Final”. O trabalho dos autores Monier e Heston (2011) apresentou os possíveis cenários de disposição final dos materiais que compõem um PSF, os quais estão sintetizados no fluxograma apresentado na FIGURA 21. Os dados apresentados por esses autores determinaram os cenários possíveis que foram cadastrados nessa fase, resultando no cadastramento de “Reciclagem”, “Aterro Sanitário” e “Incineração” (Reciclagem energética).

FIGURA 22 - FLUXOGRAMA DA DISPOSIÇÃO FINAL DO PSF AVALIADO



FONTE: O autor (2019).

Assim, como se pode ver na FIGURA 23 logo abaixo, o cenário de Destino Final foi cadastrado no Simapro considerando que 100% dos resíduos ou serão reciclados, ou serão incinerados ou serão encaminhados para aterros:

FIGURA 23 - CENÁRIO DE DESTINO FINAL NO SOFTWARE SIMAPRO

The screenshot displays the SIMAPRO software interface, specifically the 'Entrada/saída' (Input/output) tab. The interface includes a menu bar at the top with options like 'Arquivo', 'Formatar', 'Janela', 'Ferramentas', 'Ajuda', and a toolbar with various icons. Below the menu bar, there are four tabs: 'Documentação', 'Entrada/saída', 'Parâmetros', and 'Descrição do sistema'. The 'Entrada/saída' tab is active, showing several data entry sections.

Especificação de resíduos

Quantidade	Unidade	Categoria	Comentário
1	kg	Others	

Entradas

Entradas conhecidas da esfera tecnológica (materiais/combustíveis):

Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2	eller 2 Min	Máx	Comentário
(Insira linha aqui)						

Entradas conhecidas da esfera tecnológica (eletricidade/calor):

Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2	eller 2 Min	Máx	Comentário
(Insira linha aqui)						

Saídas

Materiais e/ou frações separadas do fluxo de resíduos:

Tipo de Material/Resíduo	Porcentagem	Comentário
Waste packaging glass, unsorted (GLO) market for Conseq, U	95 %	
Aluminium (waste treatment) (GLO) recycling of aluminium Cut-off, U	100 %	
Waste, from silicon wafer production (GLO) market for Cut-off, U	81 %	
Scrap copper (CH) market for scrap copper Cut-off, U	89 %	
Electronics scrap (GLO) market for Conseq, U	40 %	
(Insira linha aqui)		

Fluxos de resíduos restantes depois da separação:

Porcentagem	Comentário
41 %	Municipal solid waste (waste scenario) (RoW) Treatment of municipal solid waste, land
59 %	Average incineration residue (RoW) market for average incineration residue Cut-off, U
(Insira linha aqui)	

FONTE: O autor (2019).

Por fim, cadastrou-se a fase de “Reciclagem”, FIGURAS 24 e 25. As quantidades em quilogramas de materiais recuperados foram baseadas nos estudos de Monier e Heston (2011), Kang *et al.* (2012) e Paiano (2015) e que se encontram descritos no QUADRO 28 do Capítulo 5. De acordo com esses autores, é possível recuperar cerca de 83,7% dos materiais utilizados no PSF por meio da reciclagem, entre eles: vidro (95%), alumínio (100%), Silício (81%), Cobre (89%) e Prata (40%).

FIGURA 24 - FASE DE RECICLAGEM NO SOFTWARE SIMAPRO

FONTE: O autor (2019).

Na modelagem desta ACV considerou-se que 83% dos resíduos foram reciclados, restando, portanto 17% de resíduos a serem distribuídos entre incineração e aterro sanitário. Ademais, tendo como base os estudos de Monier e Heston (2011), Kang *et al.* (2012) e Paiano (2015), definiu-se que 10% dos resíduos seriam destinados à incineração e 7% a aterros sanitários. Na FIGURA 23 além dos percentuais de reciclagem dos resíduos já mencionados, nota-se no campo “Fluxos de resíduos depois da separação” duas informações com porcentagens associadas, são elas:

- Aterro Sanitário: 41% = 7%/17%;
- Incineração: 59% = 10%/17%

Dessa forma, foi possível cadastrar os três cenários de disposição final determinados para os resíduos do PSF avaliado.

FIGURA 25 - DISPOSIÇÃO FINAL DO PSF AVALIADO

Dr:\Database5\Database\Professional\ daniel PSF - [Editar cenário de resíduos processo Reciclagem - Queima - Aterro]

Arquivo Editar Calcular Ferramentas Janela Ajuda

Documentação Entradas/Saídas Parâmetros Descrição do sistema

Produtos					
Especificação de resíduos	Quantidade	Unidade	Categoria	Comentário	
Reciclagem - Queima - Aterro	1	kg	Recycling		

Entradas					
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (materiais/combustíveis)	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD*2 ou 2*SD	Min
(insira linha aqui)					
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (electricidade/calor)	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD*2 ou 2*SD	Min
(insira linha aqui)					

Saídas			
Materiais e/ou frações separadas do fluxo de resíduos	Tipo de Material/Resíduo	Porcentagem	Comentário
Alumínio reciclado	Todos os tipos de resíduos	100 %	
Vidro reciclado	Todos os tipos de resíduos	95 %	
Cobre reciclado	Todos os tipos de resíduos	85 %	
Prata reciclada	Todos os tipos de resíduos	40 %	
Silício reciclado	Todos os tipos de resíduos	81 %	
(insira linha aqui)			

Fluxos de resíduos restantes depois da separação	Porcentagem	Comentário
Municipal solid waste (RoW) treatment of, sanitary landfill Con	41 %	
Municipal solid waste (waste scenario) (RoW) treatment of mun	59 %	
(insira linha aqui)		

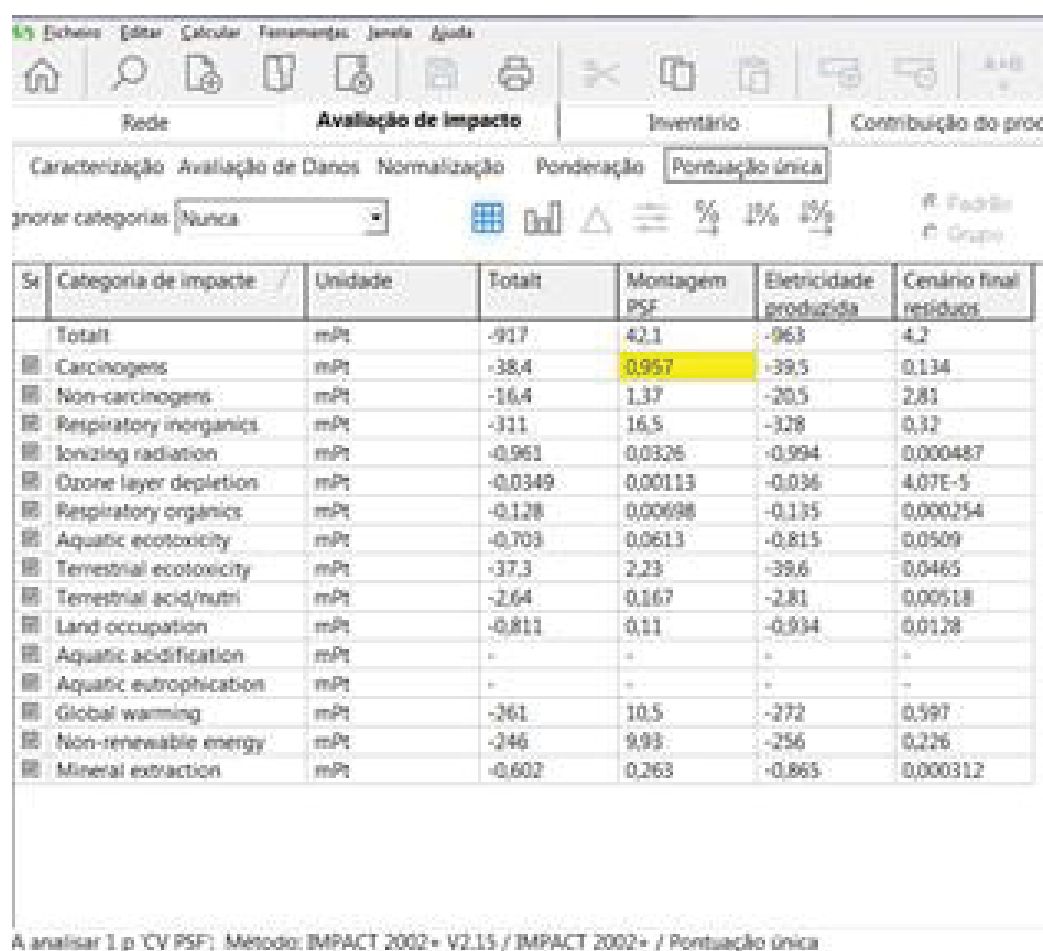
FONTE: O autor (2019).

6.3 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE CICLO DE VIDA

A primeira análise da ACV realizada pode ser vista no GRÁFICO 3, o qual trata a avaliação de impacto, sob o critério de “pontuação única”, ao longo das três etapas do ciclo de vida do PSF avaliado: fabricação, uso e destinação final. Com base neste gráfico, observa-se que a etapa que gerou mais impactos ambientais foi a de uso. Isso ocorreu pelo fato de o painel durante a fase de uso consumir energia solar (recurso natural) e utilizar água para resfriar sua estrutura, liberando água na forma de efluente e na forma de vapor de água.

Um segundo dado relevante da ACV pode ser visto na Avaliação de Impacto, também sob o critério de Pontuação Única, porem na forma de gráfico. Com base nos valores apresentados nas FIGURA 26 e 27 percebe-se, do ponto de vista ambiental, que o PSF obtém um impacto ambiental potencial positivo, fato esse que fica evidenciado nos valores negativos da coluna "Total". É relevante observar que as fases do ciclo de vida "fabricação" e "uso" geram impactos potenciais negativos para o meio ambiente. Entretanto, a destinação final avaliada neste estudo de caso, em que 83% dos resíduos são reciclados, geram impactos positivos ao meio ambiente, uma vez que estes resíduos se tornam possíveis matérias-primas para novos processos produtivos (minimiza o impacto potencial da extração de recursos naturais), evita que haja gasto energético para realizar a extração desses recursos, além de evitar a geração do lodo de rejeitos resultante da extração de minérios, como o alumínio.

FIGURA 26 - CATEGORIA DE DANOS POR FASE DO CICLO DE VIDA - DADOS EM "mPt"



Sr	Categoria de impacto	Unidade	Total	Montagem PSF	Eletricidade produção	Cenário final resíduos
	Total	mPt	-917	42,1	-963	4,2
	Carcinogens	mPt	-38,4	0,957	-39,5	0,134
	Non-carcinogens	mPt	-16,4	1,37	-20,5	2,81
	Respiratory inorganics	mPt	-311	16,5	-328	0,32
	Ionizing radiation	mPt	-0,961	0,0326	-0,994	0,000487
	Ozone layer depletion	mPt	-0,0349	0,00113	-0,036	4,07E-5
	Respiratory organics	mPt	-0,128	0,00698	-0,135	0,000254
	Aquatic ecotoxicity	mPt	-0,703	0,0613	-0,815	0,0509
	Terrestrial ecotoxicity	mPt	-37,3	2,23	-39,6	0,0465
	Terrestrial acid/nutri	mPt	-2,64	0,167	-2,81	0,00618
	Land occupation	mPt	-0,811	0,11	-0,934	0,0138
	Aquatic acidification	mPt	-	-	-	-
	Aquatic eutrophication	mPt	-	-	-	-
	Global warming	mPt	-261	10,5	-272	0,597
	Non-renewable energy	mPt	-246	9,93	-256	0,226
	Mineral extraction	mPt	-0,602	0,263	-0,865	0,000312

A analisar 1 p. CV PSF | Método: IMPACT 2002+ V2.15 / IMPACT 2002+ / Pontuação única

FONTE: O autor (2019).

FIGURA 27 - CATEGORIA DE DANOS POR FASE DO CICLO DE VIDA - DADOS EM "%"

Sr	Categoria de impacto /	Unidade	Total	Montagem PSF	Eletricidade produzida	Cenário final resíduos
	Total	%	-100	100	-100	100
	Carcinogens	%	-4,19	2,27	-4,1	3,2
	Non-carcinogens	%	-1,78	3,26	-2,13	66,8
	Respiratory inorganics	%	-34	39,2	-34,1	7,61
	Ionizing radiation	%	-0,105	0,0774	-0,103	0,0116
	Ozone layer depletion	%	-0,0038	0,00269	-0,00374	0,000949
	Respiratory organics	%	-0,014	0,0166	-0,014	0,00606
	Aquatic ecotoxicity	%	-0,0767	0,145	-0,0847	1,21
	Terrestrial ecotoxicity	%	-4,07	5,29	-4,11	1,11
	Terrestrial acid/nutri	%	-0,288	0,397	-0,292	0,123
	Land occupation	%	-0,0885	0,261	-0,097	0,306
	Aquatic acidification	%	-	-	-	-
	Aquatic eutrophication	%	-	-	-	-
	Global warming	%	-28,5	24,9	-28,3	14,2
	Non-renewable energy	%	-26,9	23,6	-26,6	5,38
	Mineral extraction	%	-0,0657	0,623	-0,0898	0,00742

A analisar 1 p. CV PSF; Método: IMPACT 2002+ V2.15 / IMPACT 2002+ / Pontuação única

FONTE: O autor (2019).

Estes resultados mostram que o ganho (impacto positivo) devido a não utilização da Energia da rede brasileira na energia é muito maior que o impacto da fabricação (montagem) ou mesmo da destinação do painel. Sendo assim, o fato do PSF gerar energia localizada no local de consumo faz com que ele tenha um desempenho ambiental consideravelmente positivo.

Na sequência, as FIGURAS 28 e 29 e o GRÁFICO 4 apresentarão exclusivamente a contribuição do processo de “montagem”.

FIGURA 28 - FASE DE MONTAGEM - CATEGORIA DE DANOS POR FASE DO CICLO DE VIDA - DADOS EM "mPt"

N.º	Processo	Projecto	Unidade	Totalt	Montagem PSF
	Total de todos os processos		Pt	-0.917	0.0421
	Processos restantes		Pt	-0.628	0.00896
1	Hard coal (CN) hard coal mine operation and hard coal	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.000785	0.00254
2	Flat glass, uncoated (RoW) production Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	0.0022	0.0022
3	Electricity, high voltage (ID) electricity production, lign	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	9.14E-5	0.00146
4	Electricity, high voltage (RfC) electricity production, lign	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	8.49E-6	0.00116
5	Electricity, high voltage (SERC) electricity production, lign	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	1.18E-5	0.00104
6	Electricity, high voltage, for internal use in coal mining	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.000267	0.000862
7	Blasting (RoW) processing Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.00568	0.000768
8	Natural gas, high pressure (RU) natural gas production	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.000433	0.000747
9	Heat, district or industrial, other than natural gas (RoW)	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.000778	0.000743
10	Natural gas, high pressure (RoW) natural gas production	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.0645	0.000671
11	Ethylene, average (RoW) production Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	0.000623	0.000656
12	Hard coal, run-of-mine (IN) hard coal mine operation	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.0001	0.000517
13	Natural gas, high pressure (DZ) natural gas production	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.016	0.00047
14	Electricity, high voltage (WECC, US only) electricity production	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	3.3E-6	0.000468
15	Flat glass, uncoated (RER) production Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	0.000452	0.000454
16	Lignite (RoW) mine operation Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.0169	0.000433
17	Blasting (RER) processing Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.00288	0.00043

A analisar 1 p CV PSF: Método: IMPACT 2002+ V2.15 / IMPACT 2002+ / Pontuação única

FONTE: O autor (2019).

FIGURA 29 - FASE DE MONTAGEM - CATEGORIA DE DANOS POR FASE DO CICLO DE VIDA - DADOS EM "%"

N.º	Processo	Projecto	Unidade	Totalt	Montagem PSF
	Total de todos os processos		Pt	-0.917	0.0421
	Processos restantes		Pt	-0.628	0.00896
1	Hard coal (CN) hard coal mine operation and hard coal	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.000785	0.00254
2	Flat glass, uncoated (RoW) production Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	0.0022	0.0022
3	Electricity, high voltage (ID) electricity production, lign	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	9.14E-5	0.00146
4	Electricity, high voltage (RfC) electricity production, lign	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	8.49E-6	0.00116
5	Electricity, high voltage (SERC) electricity production, lign	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	1.18E-5	0.00104
6	Electricity, high voltage, for internal use in coal mining	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.000267	0.000862
7	Blasting (RoW) processing Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.00568	0.000768
8	Natural gas, high pressure (RU) natural gas production	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.000433	0.000747
9	Heat, district or industrial, other than natural gas (RoW)	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.000778	0.000743
10	Natural gas, high pressure (RoW) natural gas production	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.0645	0.000671
11	Ethylene, average (RoW) production Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	0.000623	0.000656
12	Hard coal, run-of-mine (IN) hard coal mine operation	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.0001	0.000517
13	Natural gas, high pressure (DZ) natural gas production	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.016	0.00047
14	Electricity, high voltage (WECC, US only) electricity production	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	3.3E-6	0.000468
15	Flat glass, uncoated (RER) production Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	0.000452	0.000454
16	Lignite (RoW) mine operation Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.0169	0.000433
17	Blasting (RER) processing Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.00288	0.00043

A analisar 1 p CV PSF: Método: IMPACT 2002+ V2.15 / IMPACT 2002+ / Pontuação única

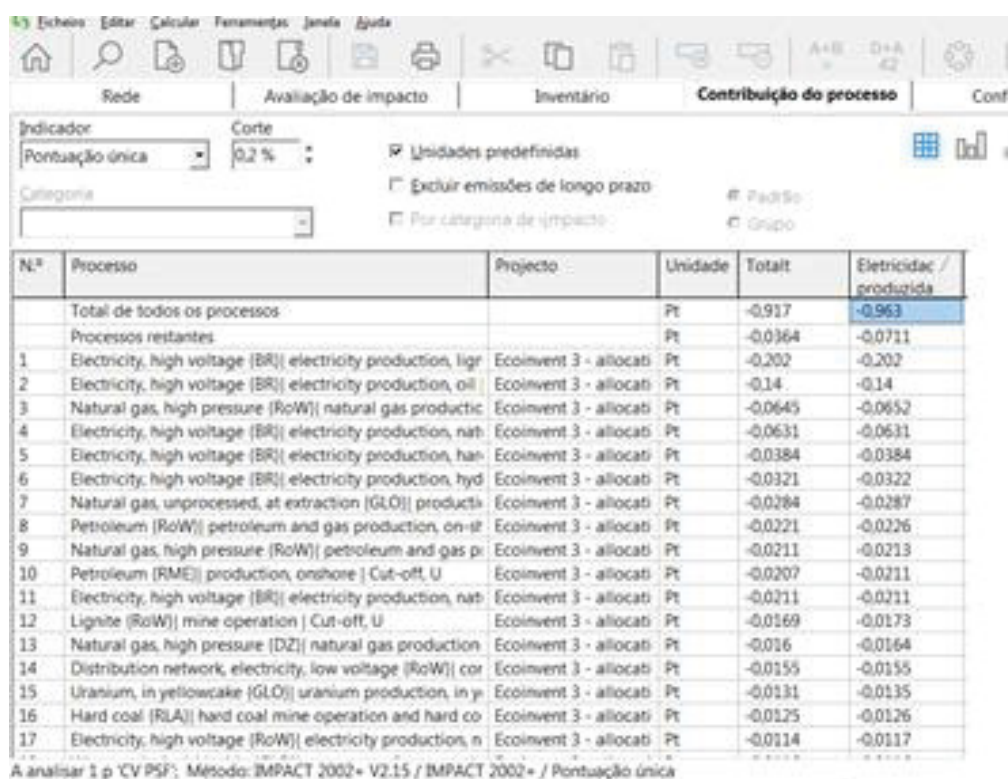
FONTE: O autor (2019).

Estes resultados mostram que o uso de Energia elétrica, Energia térmica (carvão) e os materiais para fabricação do Vidro acabam por acarretar os maiores impactos na montagem do PSF avaliado.

A seguir, as FIGURAS 30 e 31 e o GRÁFICO 5 apresentam os resultados referentes à eletricidade produzida. Os resultados mostram que o fato de se deixar de usar Eletricidade da Rede faz com que sejam obtidos os maiores ganhos (melhores desempenhos). Ou seja, o impacto maior positivo vem do fato de se evitar o uso de eletricidade da rede brasileira de energia.

Importante ressaltar que este benefício valorizado pela ACV não é reconhecido para um cenário com foco na circularidade, pois os materiais considerados para fabricação do PSF foram de matérias-primas in natura e, entre os destinos cadastrados, encontram-se encaminhamentos para aterro e incineração. Assim, do ponto de vista de desempenho ambiental, compreendesse que o resultado foi consideravelmente positivo. Portanto, neste estudo de caso, a ACV demonstrou que, mesmo sem grande circularidade do produto, o fato dele economizar consumo de energia e recursos da Eletricidade da rede brasileiro resultou num desempenho ambiental positivo.

FIGURA 30 - ELETRICIDADE PRODUZIDA - CATEGORIA DE DANOS POR FASE DO CICLO DE VIDA - DADOS EM "mPt"

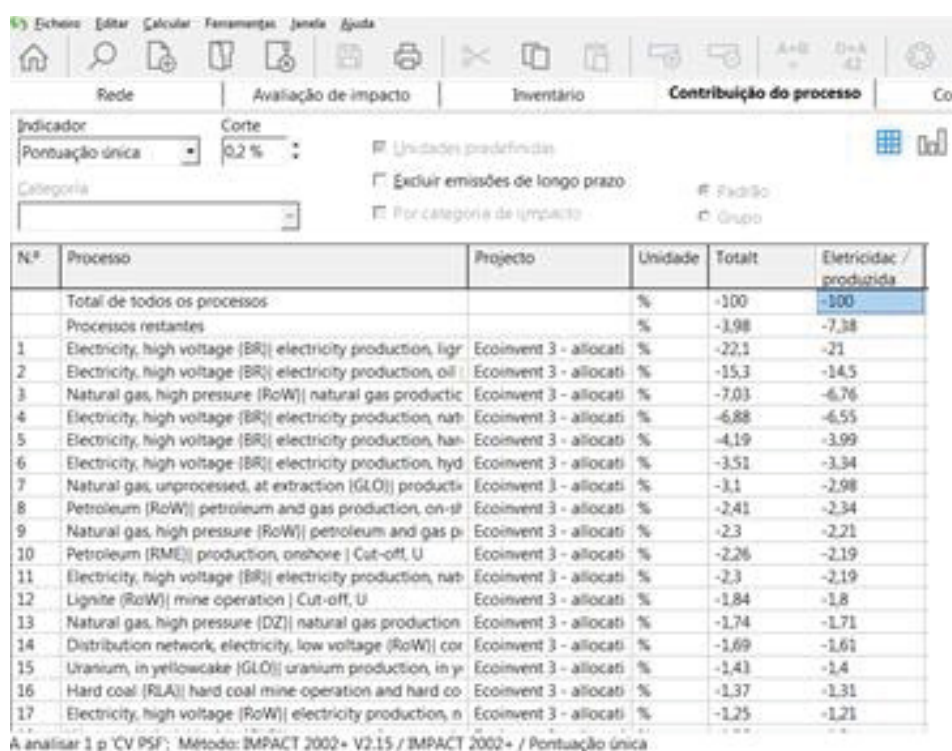


N.º	Processo	Projecto	Unidade	Totalt	Electricidad / produzida
	Total de todos os processos		Pt	-0.917	-0.963
	Processos restantes		Pt	-0.0364	-0.0711
1	Electricity, high voltage (BR) electricity production, lig	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.202	-0.202
2	Electricity, high voltage (BR) electricity production, oil	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.14	-0.14
3	Natural gas, high pressure (RoW) natural gas productic	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.0645	-0.0652
4	Electricity, high voltage (BR) electricity production, nat	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.0631	-0.0631
5	Electricity, high voltage (BR) electricity production, han	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.0384	-0.0384
6	Electricity, high voltage (BR) electricity production, hyd	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.0321	-0.0322
7	Natural gas, unprocessed, at extraction (GLO) producti	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.0284	-0.0287
8	Petroleum (RoW) petroleum and gas production, on-st	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.0221	-0.0226
9	Natural gas, high pressure (RoW) petroleum and gas pi	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.0211	-0.0213
10	Petroleum (RME) production, onshore Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.0207	-0.0211
11	Electricity, high voltage (BR) electricity production, nat	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.0211	-0.0211
12	Lignite (RoW) mine operation Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.0169	-0.0173
13	Natural gas, high pressure (DZ) natural gas production	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.016	-0.0164
14	Distribution network, electricity, low voltage (RoW) cor	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.0155	-0.0155
15	Uranium, in yellowcake (GLO) uranium production, in y	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.0131	-0.0135
16	Hard coal (RLA) hard coal mine operation and hard co	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.0125	-0.0126
17	Electricity, high voltage (RoW) electricity production, n	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0.0114	-0.0117

A analisar 1 p CV PSF; Método: IMPACT 2002+ V2.15 / IMPACT 2002+ / Pontuação única

FONTE: O autor (2019).

FIGURA 31 - ELETRICIDADE PRODUZIDA - CATEGORIA DE DANOS POR FASE DO CICLO DE VIDA - DADOS EM "%"

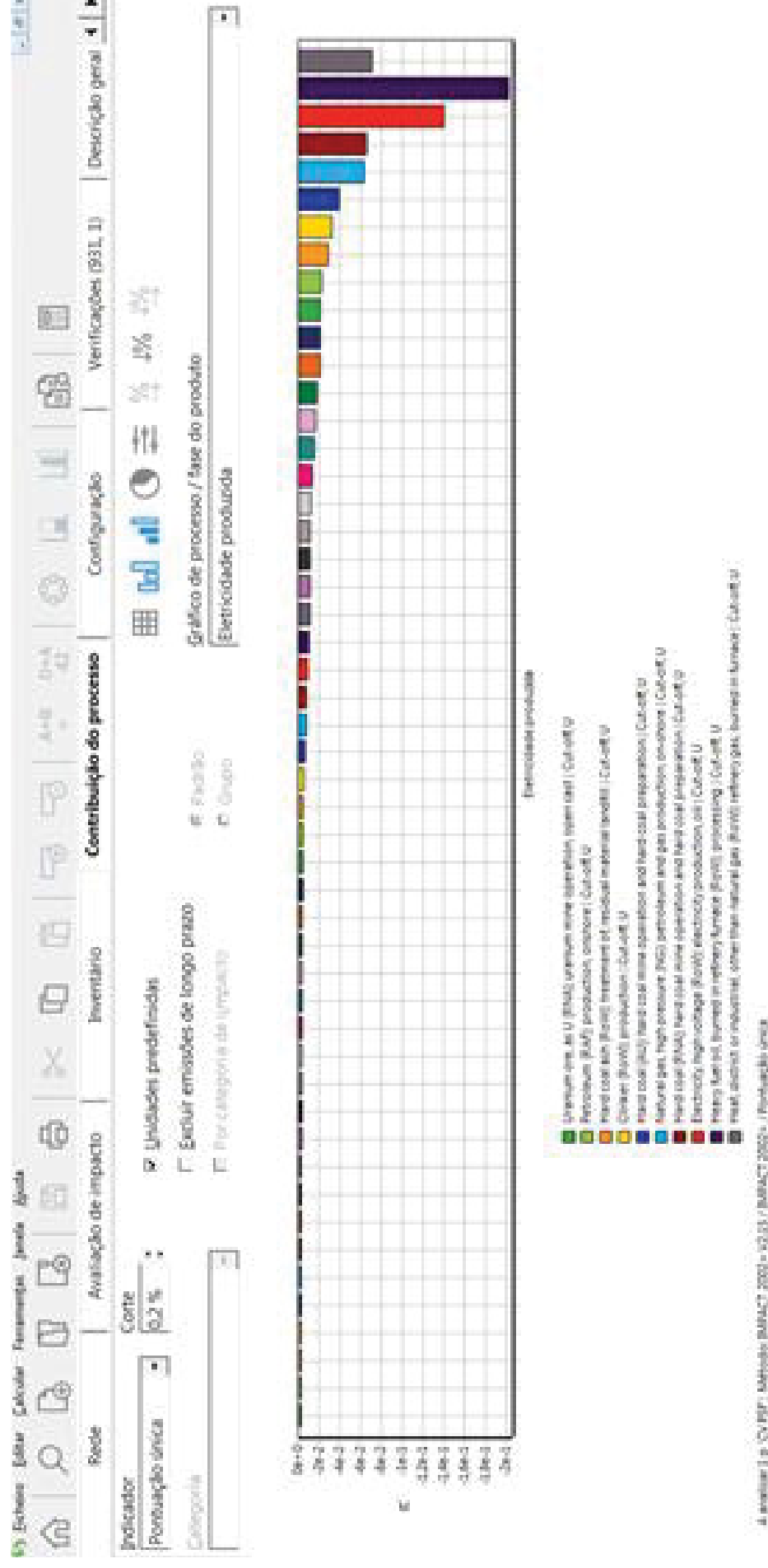


N.º	Processo	Projecto	Unidade	Totalt	Electricidad / produzida
	Total de todos os processos		%	-100	-100
	Processos restantes		%	-3.98	-7.38
1	Electricity, high voltage (BR) electricity production, lig	Ecoinvent 3 - allocati	%	-22.1	-21
2	Electricity, high voltage (BR) electricity production, oil	Ecoinvent 3 - allocati	%	-15.3	-14.5
3	Natural gas, high pressure (RoW) natural gas productic	Ecoinvent 3 - allocati	%	-7.03	-6.76
4	Electricity, high voltage (BR) electricity production, nat	Ecoinvent 3 - allocati	%	-6.88	-6.55
5	Electricity, high voltage (BR) electricity production, han	Ecoinvent 3 - allocati	%	-4.19	-3.99
6	Electricity, high voltage (BR) electricity production, hyd	Ecoinvent 3 - allocati	%	-3.51	-3.34
7	Natural gas, unprocessed, at extraction (GLO) producti	Ecoinvent 3 - allocati	%	-3.1	-2.98
8	Petroleum (RoW) petroleum and gas production, on-st	Ecoinvent 3 - allocati	%	-2.41	-2.34
9	Natural gas, high pressure (RoW) petroleum and gas pi	Ecoinvent 3 - allocati	%	-2.3	-2.21
10	Petroleum (RME) production, onshore Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocati	%	-2.26	-2.19
11	Electricity, high voltage (BR) electricity production, nat	Ecoinvent 3 - allocati	%	-2.3	-2.19
12	Lignite (RoW) mine operation Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocati	%	-1.84	-1.8
13	Natural gas, high pressure (DZ) natural gas production	Ecoinvent 3 - allocati	%	-1.74	-1.71
14	Distribution network, electricity, low voltage (RoW) cor	Ecoinvent 3 - allocati	%	-1.69	-1.61
15	Uranium, in yellowcake (GLO) uranium production, in y	Ecoinvent 3 - allocati	%	-1.43	-1.4
16	Hard coal (RLA) hard coal mine operation and hard co	Ecoinvent 3 - allocati	%	-1.37	-1.31
17	Electricity, high voltage (RoW) electricity production, n	Ecoinvent 3 - allocati	%	-1.25	-1.21

A analisar 1 p CV PSF; Método: IMPACT 2002+ V2.15 / IMPACT 2002+ / Pontuação única

FONTE: O autor (2019).

GRÁFICO 5 - CONTRIBUIÇÃO DO PROCESSO DE ELETRICIDADE PROZUDIDA - IMPACTOS AMBIENTAIS



FONTE: O autor (2019).

Já as FIGURAS 33 e 33 e o GRÁFICO 6 apresentam os resultados referentes ao cenário final de resíduos.

FIGURA 32 - CENÁRIO FINAL DE RESÍDUOS - CATEGORIA DE DANOS POR FASE DO CICLO DE VIDA - DADOS EM "mPt"

C:\Users\Public\Documents\Daniel\Dados - Daniel\Profissional Daniel - Dissertação - (Análise CV PSF)

Arquivo Editar Calcular Parâmetros Janela Ajuda

Rede Avaliação de impacto Inventário Contribuição do processo

Indicador: Pontuação única Corte: 0,2 % Unidades predefinidas

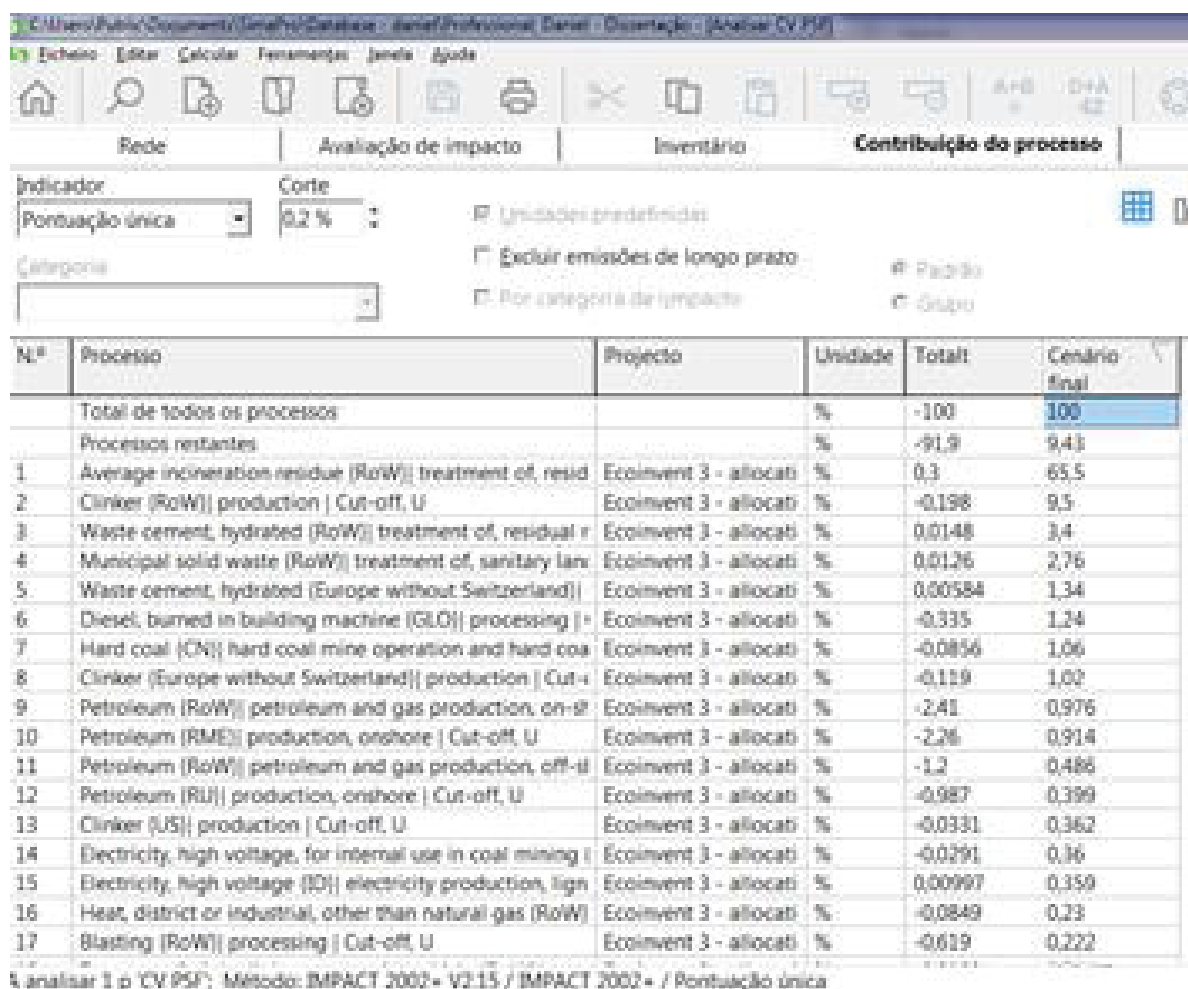
Categoria: Excluir emissões de longo prazo Por categoria de impacto

Nº	Processo	Projecto	Unidade	Total	Cenário final
	Total de todos os processos		Pt	-0,917	0,0042
	Processos restantes		Pt	-0,843	0,000396
1	Average incineration residue (RoW) treatment of, resid	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	0,00275	0,00275
2	Clinker (RoW) production Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0,00182	0,000399
3	Waste cement, hydrated (RoW) treatment of, residual r	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	0,000136	0,000143
4	Municipal solid waste (RoW) treatment of, sanitary lan	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	0,000115	0,000116
5	Waste cement, hydrated (Europe without Switzerland)	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	5,35E-5	5,64E-5
6	Diesel, burned in building machine (GLO) processing	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0,00307	5,2E-5
7	Hard coal (CN) hard coal mine operation and hard coa	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0,000785	4,45E-5
8	Clinker (Europe without Switzerland) production Cut-	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0,00109	4,27E-5
9	Petroleum (RoW) petroleum and gas production, on-sh	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0,0221	4,1E-5
10	Petroleum (RME) production, onshore Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0,0207	3,84E-5
11	Petroleum (RoW) petroleum and gas production, off-sh	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0,011	2,04E-5
12	Petroleum (RU) production, onshore Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0,00905	1,68E-5
13	Clinker (US) production Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0,000303	1,52E-5
14	Electricity, high voltage, for internal use in coal mining	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0,000267	1,51E-5
15	Electricity, high voltage (ID) electricity production, ligh	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	9,14E-5	1,51E-5
16	Heat, district or industrial, other than natural gas (RoW)	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0,000778	9,67E-6
17	Blasting (RoW) processing Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocati	Pt	-0,00568	9,34E-6

A análise 1 p CV PSF; Método: IMPACT 2002+ V2.15 / IMPACT 2002+ / Pontuação única

FONTE: O autor (2019).

FIGURA 33 - CENÁRIO FINAL DE RESÍDUOS - CATEGORIA DE DANOS POR FASE DO CICLO DE VIDA - DADOS EM "%"



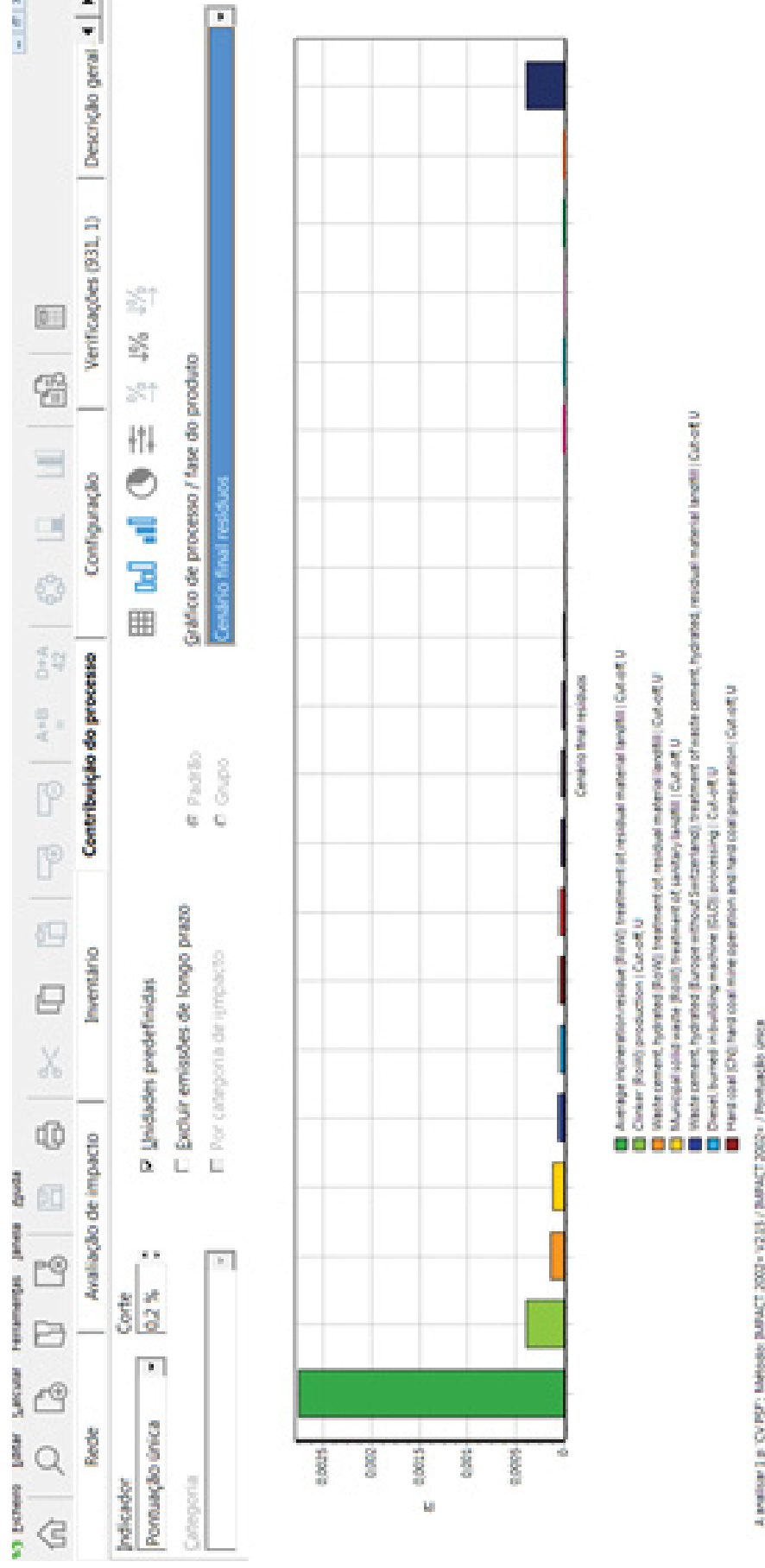
N.º	Processo	Projecto	Unidade	Total	Cenário final
	Total de todos os processos		%	-100	100
	Processos restantes		%	-91,9	9,1
1	Average incineration residue (RoW) treatment of, resid	Ecoinvent 3 - allocati	%	0,3	65,5
2	Clinker (RoW) production Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocati	%	-0,198	9,5
3	Waste-cement, hydrated (RoW) treatment of, residual r	Ecoinvent 3 - allocati	%	0,0148	3,4
4	Municipal solid waste (RoW) treatment of, sanitary lan	Ecoinvent 3 - allocati	%	0,0126	2,76
5	Waste-cement, hydrated (Europe without Switzerland)	Ecoinvent 3 - allocati	%	0,00584	1,34
6	Diesel, burned in building machine (GLO) processing	Ecoinvent 3 - allocati	%	-0,335	1,24
7	Hard coal (CN) hard coal mine operation and hard coa	Ecoinvent 3 - allocati	%	-0,0856	1,06
8	Clinker (Europe without Switzerland) production Cut-	Ecoinvent 3 - allocati	%	-0,119	1,02
9	Petroleum (RoW) petroleum and gas production, on-sh	Ecoinvent 3 - allocati	%	-2,41	0,976
10	Petroleum (RME) production, onshore Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocati	%	-2,26	0,914
11	Petroleum (RoW) petroleum and gas production, off-sh	Ecoinvent 3 - allocati	%	-1,2	0,488
12	Petroleum (RU) production, onshore Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocati	%	-0,987	0,399
13	Clinker (US) production Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocati	%	-0,0331	0,362
14	Electricity, high voltage, for internal use in coal mining	Ecoinvent 3 - allocati	%	-0,0291	0,36
15	Electricity, high voltage (ID) electricity production, lign	Ecoinvent 3 - allocati	%	0,00997	0,359
16	Heat, district or industrial, other than natural gas (RoW)	Ecoinvent 3 - allocati	%	-0,0849	0,23
17	Blasting (RoW) processing Cut-off, U	Ecoinvent 3 - allocati	%	-0,619	0,222

% analisar 1 p 'CV PSF'; Método: IMPACT 2002+ V2.15 / IMPACT 2002+ / Pontuação única

FONTE: O autor (2019).

O resultado de pior desempenho foi a incineração de resíduos. Apesar disso, o destino final do PSF pouco influenciou no impacto ambiental potencial. Do ponto de vista da Circularidade, este resultado é o oposto do considerado, já que o destino tem influência considerável na avaliação de cenários circulares.

GRÁFICO 6 - CONTRIBUIÇÃO DO PROCESSO CENÁRIO FINAL DE RESÍDUOS - IMPACTOS AMBIENTAIS



FONTE: O autor (2019).

Por fim, faz-se necessário reforçar algumas limitações deste estudo ACV que a tornaram um estudo de ACV simplificado:

- Na fase de montagem, a estrutura metálica que apoia as serve de apoio para o PSF e para as inversores não foi considerado;
- No cenário de destino final, os gastos de energia e recuperação foram considerados dos processos do Ecoinvent, porém não foram considerados os impactos de desmontagem ou de transporte.
- O cadastramento da destinação final “reciclagem” não considerou as distâncias a serem percorridas entre os pontos de coleta dos painéis solares fotovoltaicos inservíveis até as usinas de reciclagem. Tais informações poderiam alterar profundamente os resultados avaliados.

7 REFLEXÕES SOBRE A COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS FERRAMENTAS ANALÍTICAS DE CIRCULARIDADE E A ACV PARA O PSF

Confirmando o entendimento de Saidani (2017), nenhuma das 3 ferramentas de avaliação de circularidade analisadas neste estudo foi capaz de suprir todas as necessidades de engenheiros, designers e gerentes industriais, os quais apresentam expectativas distintas quanto à aplicabilidade das metodologias de avaliação de circularidade. Uma hipótese definida no início dessa pesquisa era a de que os resultados alcançados pela metodologia ACV pudessem complementar as lacunas que as 3 ferramentas de circularidade estudadas não conseguem atender por completo.

A lacuna que se propôs ser explorada por este estudo de caso teve como uma de suas motivações a perspectiva identificada por Walker *et al.* (2018). Segundo este autor, a ferramenta de avaliação de circularidade ideal não devia limitar-se a somente mensurar taxas de reciclagem ou de conteúdo reciclado de um determinado produto avaliado. Mais do que isso, o autor já relatava a possibilidade de estudos de aplicação de ferramentas de circularidade poderem ser complementados por estudos de ACV. Os resultados deste estudo de caso reforçam a opinião do autor. O QUADRO 30 a seguir apresenta um compilado das conclusões da aplicação das ferramentas de circularidade e da ACV no objeto de estudo.

QUADRO 30 - REFLEXÃO SOBRE AS FERRAMENTAS CET, CEIP, MCI E ACV

CET	CEIP	MCI	ACV
Circular Economy Toolkit	Circular Economy Indicator Prototype	Material Circularity Indicator	Avaliação do Ciclo de Vida
Fase de "Fabricação" apresentou maior potencial de melhoria, principalmente por utilizar apenas matérias-primas in natura	Fase de "Fabricação" gerou impactos ambientais negativos, principalmente por utilizar apenas matérias-primas in natura	Fase de "Fabricação" gerou impactos ambientais negativos, principalmente por utilizar apenas matérias-primas in natura	Fase de "Fabricação" gerou impactos ambientais negativos
Em função do PSF apresentar um ciclo de vida projetado para 25 anos , isso contou favoravelmente para a avaliação de circularidade	Em função do PSF apresentar um ciclo de vida projetado para 25 anos, isso majorou o valor esperado para o CEIP	Em função do PSF apresentar um ciclo de vida projetado para 25 anos, isso majorou o valor esperado para o MCI	A fase de "Uso" foi a que gerou mais impactos ambientais em função da geração de energia elétrica e de água para resfriar a estrutura

Reciclagem, reusos, reaproveitamento, redução de matérias-primas, remanufatura, redução de resíduos apresentam o mesmo impacto positivo na ferramenta	Reciclagem, reusos, reaproveitamento, redução de matérias-primas, remanufatura, redução de resíduos apresentam o mesmo impacto positivo na ferramenta	A reciclagem gera valores positivos para o MCI. Porém, o reuso geraria valores ainda maiores	Fase de " Disposição Final " gerou impactos ambientais positivos em função da Reciclagem
A redução de matérias-primas in natura é um ponto valorizado pela CET	A redução de matérias-primas in natura majora o valor da CET	A redução de matérias-primas in natura majora o valor da MCI	Benefícios da reciclagem: - Reduz a extração de matérias-primas in natura - Evita o gasto energético na extração de recursos da natureza - Evita a geração de lodo resultante da extração de minérios, como o alumínio
Chumbo e Estanho: Na avaliação da CET o problema associado a esses metais foi o fato de eles terem sido encaminhados ao aterro sanitário, o que é considerado uma destinação final não circular , o que reduz o valor de circularidade do PSF	Chumbo e Estanho: Na avaliação do CEIP o problema associado a esses metais foi o fato de eles terem sido encaminhados ao aterro sanitário, o que é considerado uma destinação final não circular , o que reduz o valor de circularidade do PSF	Chumbo e Estanho: Produtos perigosos como Estanho e Chumbo devem ser eliminados do processo produtivo, de acordo com a EMF. No entanto, na avaliação do MCI o problema associado a esses metais foi o fato de eles terem sido encaminhados ao aterro sanitário, o que é considerado uma destinação final não circular , o que reduz o valor de circularidade do PSF	Chumbo e Estanho: A ACV não considerou a toxicidade do Estanho e do Chumbo como relevantes Na ACV o destino considerado para esses metais foi o aterro sanitário, que do ponto de vista da Economia Circular não é uma solução circular.
A incineração dos polímeros não é considerada como uma destinação final circular . Do ponto de vista da CET, isso representa um potencial de melhoria a ser explorado	A incineração dos polímeros não é considerada como uma destinação final circular. Assim, o valor do CEIP acabou tendo seu valor reduzido	A incineração dos polímeros não é considerada como uma destinação final circular. Assim, o valor do MCI acabou sendo reduzido.	A incineração dos polímeros é vista pela ACV como uma solução de disposição final melhor do que o Aterro Sanitário . No entanto, do ponto de vista da EC, esta não é uma solução circular

FONTE: O autor (2019)

De acordo com os resultados apresentados pela MCI, utilizar matérias-primas de origem reciclada ou utilizar o reuso no processo produtivo torna o produto mais circular e o fato de o PSF avaliado não apresentar essas características reduziu o

valor mensurado pelo MCI para aproximadamente 44%. Por sua vez, a metodologia ACV ao avaliar as três fases do ciclo de vida do produto enxergou a fase de uso como sendo a maior geradora de impactos ambientais, seguido pela fabricação e então pela disposição final. A modelagem da ACV obedeceu aos mesmos critérios e limitações da aplicação das outras ferramentas de circularidade, o que significa que também foram utilizadas na ACV apenas matérias-primas de primeira ordem. A conclusão da ACV nesse aspecto é de que, ao contrário do que a MCI aponta, o fato das matérias-primas utilizadas neste processo não serem de origem recicladas não foi tão relevante, indicando que foi mais importante buscar soluções sustentáveis para a disposição dos resíduos.

Ainda sobre a ferramenta MCI, sabe-se que ela valoriza mais o reuso do que a reciclagem. Neste aspecto, a comparação com a ACV ficou comprometida, já que a modelagem não considerou o reuso, apenas a reciclagem. Nesse ponto, ambas enxergaram a reciclagem como fundamentais para se obter benefícios ambientais.

Ainda neste ponto, notou-se que o desempenho da ferramenta CEIP. Em função de sua configuração, matérias-primas recicladas ou de reuso apresentam a mesma importância. Da mesma forma, se a destinação final dos resíduos for reciclagem ou reuso ou outra forma de reaproveitamento, do ponto de vista da ferramenta CEIP todas elas resultam no mesmo benefício, o que contribuiu para que o PSF avaliado apresentasse um percentual de circularidade de 57,2%, ou seja, maior que os cerca de 44% apresentados pela MCI.

Ainda sobre a avaliação de circularidade realizada pela ferramenta CEIP, notou-se a fase “Fim da Vida Útil”, a qual avalia o que ocorre com os resíduos foi a mais valorizada em função do potencial do PSF em ser recuperado por meio da reciclagem ou do reuso. Tal resposta foi sustentada pela metodologia ACV, já que o potencial de reciclagem dos resíduos do PSF fez com que a ACV apresentasse os melhores “ecopontos” na fase de destinação final.

Sobre a aplicação da ferramenta CET no objeto de estudo notou-se o potencial de melhoria a ser explorado na preservação, no reparo, na reforma, na remanufatura e no estabelecimento do produto como um serviço. Em princípio, não foi encontrada similaridade com o resultado apresentado pela ACV.

Outro aspecto que merece destaque diz respeito aos produtos considerados tóxicos ou perigosos presentes na composição química do PSF avaliado. Entre os resíduos gerados pelo PSF avaliado após o fim de sua via útil, estão o chumbo e o estanho. De acordo com os preceitos da Economia Circular definidos pela Fundação Ellen MacArthur, materiais dessa natureza devem ser evitados. Entretanto, ao avaliar a circularidade do objeto de estudo com a ferramenta MCI, indicador esse desenvolvido pela referida fundação, notou-se que tais componentes tóxicos não influenciaram significativamente o resultado de impacto ambiental potencial pela ACV. Da mesma forma, a avaliação de desempenho ambiental realizada por meio da técnica ACV também não evidenciou esses metais como causadores de impactos ambientais relevantes. Isso pode ser explicado em função da reduzida composição desses metais no produto avaliado, já que chumbo e estanho representam respectivamente 0,07% e 0,12% dos componentes do PSF avaliado. Outra explicação possível seria pelo fato de se ter considerado que tais produtos seriam encaminhados diretamente a aterros sanitários próprios para resíduos industriais perigosos, evitando assim maiores contatos com humanos caso fossem integrados em processos de reciclagem.

Por fim, o resultado da comparação das ferramentas de circularidade com aplicação da técnica ACV evidenciou as seguintes constatações:

- ACV e EC não são diretamente proporcionais, e, portanto, não são diretamente relacionadas;
- O fato de um produto apresentar desempenho ambiental favorável, segundo a avaliação da ACV, não significa que ele apresenta alto grau de circularidade;
- Da mesma forma, nem sempre um processo mais circular apresenta um desempenho ambiental mais favorável;
- A ACV permite quantificar impactos por fases e pode auxiliar a direcionar fases de implementação de ações de economia circular.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve como intuito avaliar a circularidade de produtos, utilizando-se para tanto de ferramentas de avaliação de circularidade e a técnica ACV. Para atingir tal objetivo, fez-se necessário buscar na literatura ferramentas de circularidade capazes de serem aplicadas ao objeto de estudo, o qual consistiu no painel solar fotovoltaico de silício monocristalino 350M6K-36-SÉRIE-5BB fabricada pela empresa BYD.

Em princípio foram identificadas 31 ferramentas de circularidade que, após a exclusão das ferramentas que não fossem do nível de abrangência de “Micro” e que fossem aplicáveis apenas a segmentos específicos (produtos químicos, polímeros ou construção civil), culminaram numa lista de 20 ferramentas, esse sim, de nível abrangência “Micro” e possíveis de serem aplicadas a qualquer tipo de produto. Sobre essa lista de 20 ferramentas, aplicou-se um novo filtro, dessa vez quanto ao atendimento delas aos 6 objetivos da EC traçados pela Fundação Ellen MacArthur. Como resultado, as ferramentas identificadas como sendo mais robustas foram a CET de Evans e Bocken (2013), a CEIP de Cayzer *et al.* (2017) e a MCI da Fundação Ellen MacArthur (2015), as quais foram aplicadas ao objeto de estudo.

Na sequência foi realizada a ACV simplificada do PSF e seus resultados foram confrontados com as considerações obtidas da aplicação das três ferramentas de circularidade selecionadas.

Em relação as demais ferramentas de circularidade (CEIP e MCI), *Circular Economy Toolkit* (CET), proposta por Evans e Bocken (2013), diferencia-se das demais ferramentas abordadas neste estudo por ser exclusivamente qualitativa. Uma alternativa de trabalho futuro seria desenvolver uma forma de torna-la capaz de quantificar os aspectos da Economia Circular que já são apontados por ela.

A aplicação da ferramenta *Circular Economy Indicator Prototype* (CEIP) de Cayzer *et al.* (2017) no objeto evidenciou a simbiose industrial e a redução de materiais como pontos fortes do PSF avaliado. Entretanto, ao mesmo tempo a ferramenta identificou potencial de melhoria na otimização dos materiais, no uso, no reuso ou redistribuição, na preservação ou reparo, na reforma ou manufatura, na

reciclagem e na disponibilização do produto como um serviço. Em princípio, não foi encontrada similaridade da CEIP com o resultado apresentado pela ACV.

A aplicação da ferramenta CEIP, por outro lado, apresentou nítida relação com os resultados da ACV no objeto de estudo. A CEIP apontou com a fase mais impactante do ciclo de vida a etapa de “Fim da Vida Útil”, a qual avalia o que ocorre com os resíduos. A capacidade de recuperação dos resíduos por meio da reciclagem potencializou tanto a porcentagem avaliada pela CEIP quanto os “ecopontos” mensurados pela ACV na fase de destinação final. Quando comparada com a MCI, enquanto a CEIP apresentou um percentual de circularidade do PSF avaliado de 57,2%, a MCI alcançou um percentual de 44% de circularidade.

Já se sabia de antemão que a ferramenta desenvolvida pela Fundação Ellen MacArthur no ano de 2015, *Material Circularity Indicator* (MCI), caracteriza-se por valorizar mais em sua avaliação de circularidade o processo de reuso do que o de reciclagem, tudo isso com base no diagrama de borboleta proposto por essa fundação. A convenção adotada no estudo de considerar as matérias-primas como sendo 100% oriunda da natureza afetou diretamente o valor calculado pela MCI. Nesse sentido, notou-se que a MCI é uma ferramenta mais sensível à origem das matérias-primas que a CEIP. Nesse aspecto, os resultados da MCI se distanciaram dos resultados da ACV. Quando se comparou os resultados apontados pela MCI com os fornecidos pela ACV, percebeu-se que ao contrário do que a MCI apontou, o fato das matérias-primas utilizadas neste processo não serem de origem recicladas foi menos relevante do que outros aspectos, dando a entender que foi mais importante buscar soluções sustentáveis para a disposição dos resíduos.

Por sua vez, a aplicação da técnica ACV ao avaliar as três fases do ciclo de vida do produto enxergou que a fase de uso como sendo a maior geradora de impactos ambientais, seguido pela fabricação e então pela disposição final. Os resultados evidenciaram que o ganho (impacto positivo) devido a não utilização da Energia da rede foi considerável em comparação ao impacto da fabricação (montagem) ou mesmo da destinação do painel. Assim, o fato do PSF gerar energia localizada no local de consumo faz com que ele tenha um desempenho ambiental consideravelmente positivo.

Por fim, pode-se afirmar que o estudo atendeu a todos os objetivos parciais previamente definidos até alcançar o seu objetivo principal. De fato, gerou-se uma

abordagem capaz de avaliar a circularidade de um produto através de ferramentas de circularidade e que cujos resultados, quando comparados com as informações resultantes da aplicação da técnica de análise de desempenho ambiental ACV, permitiu enxergar tantos pontos de concordância quanto pontos divergentes. De todo modo, verificou-se que as ferramentas podem se complementar e que a metodologia desenvolvida nesta pesquisa permite ser replicada em outros estudos de caso.

De fato, conforme afirmam Tiozzi (2019), Niero (2019) e Lonca *et al.* (2018), ao mesmo tempo em que se reconhece a importância de serem geradas ferramentas capazes de mensurar a circularidade, ainda persiste a falta de consenso sobre o que esses indicadores de economia circular precisam medir. Estudos como o de Parchomenko *et al.* (2018) e Saidani *et al.* (2018) são exemplos de como as variáveis que devem compor indicadores de EC vem recebendo destaque nos mais recentes estudos a respeito deste assunto.

A análise de periculosidade dos componentes que compõe os PSFs é um outro desdobramento desta pesquisa que merece destaque. O estudo apresentado por Dias (2015) concluiu que os PSFs de 1ª geração devem ser classificados no ordenamento jurídico brasileiro como resíduos sólidos perigosos de Classe I, conforme dispõe a NBR 10004, pois apresentam em sua composição metais como chumbo, prata, cádmio, cromo e fluoreto. Segundo este autor, essa classificação ocorre em razão da concentração de chumbo estar acima do limite estipulado pela NBR 10005. Por conta disso, PSFs que não forem reciclados ou reutilizados precisam ter seus resíduos encaminhados a destinos próprios para resíduos industriais perigosos.

Este trabalho também apresenta potencial de continuidade com o desenvolvimento de uma nova ferramenta capaz de avaliar a circularidade de produtos que consiga conciliar os aspectos positivos encontrados nas 3 ferramentas aqui avaliadas, ao mesmo tempo em que contorne as limitações que foram evidenciadas. Outra forma de continuar a pesquisa seria acrescentar dados referentes ao gasto energético consumido no processo de reciclagem e seus impactos relacionados ao transporte dos PSFs às usinas de reciclagem.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040. **Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e estrutura.** Rio de Janeiro, 2009, 21p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004. **Resíduos sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <http://www.conhecer.org.br/download/RESIDUOS/leitura%20anexa%206.pdf>

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10005. **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/residuos/files/2014/04/ABNT-NBR-10005-Lixiviacao-de-Residuos.pdf>.

ABSOLAR. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR. Disponível em: <http://absolar.org.br/noticia/noticias-externas/veiculos-eletricos-e-energia-solar-podem-caminhar-juntos.html>. Acesso em: 28.06.2018.

ACCENTURE STRATEGY; WBCSD. **CEO Guide to the Circular Economy.** (2015). Disponível em: http://docs.wbcsd.org/2017/06/CEO_Guide_to_CE.pdf

ADISSI, J.P., et. al. **Gestão Ambiental de Unidades Produtivas.** 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

ADRIANO, G.L.M. **Análise de Ciclo de Vida da Tecnologia Fotovoltaica em Portugal.** Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Energias Renováveis, Conversão Eléctrica e Utilização Sustentável. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2015.

ALVARENGA, R.A.F. **Avaliação de Métodos de AICV: Um Estudo de Caso de Quatro Cenários de Ração para Frangos de Corte.** 158p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. Disponível em: <https://goo.gl/wWheHD>. Acesso em: 10 de maio de 2017.

AZEVEDO, S.G.; GODINA, R.; MATIAS, J.C.O. **Proposal of a Sustainable Circular Index for Manufacturing Companies.** Resources 2017, 6, 63; doi: 10.3390/resources6040063

ANEEL. **Seminário Desafios da Geração de Energia Elétrica no Brasil.** 19/10/2017. Brasília – DF. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/10184/15266087/painel+3+ap+7+2017.10.19+A+BSOLAR+-+Energia+Solar+Fotovoltaica+-+Dr.+Rodrigo+Lopes+Sauaia.pdf/54f8b161-751b-0639-bd04-77a60cac45c3>

BCG; WBCSD. **The New Big Circle: Achieving growth and business model innovation through circular economy implementation.** January, 2018. Disponível: http://docs.wbcsd.org/2018/01/The_new_big_circle.pdf

BERTRAND, J.W.M.; FRANSOO, J.C. **Modelling and simulation – operations management research methodologies using quantitative modeling.** *International Journal of Operations & Production Management*, v. 22, n. 3, p. 241-264, 2002.

BOCKEN, N.M.P.; OLIVETTI, E.A; CULLEN, J.M.; POTTING, J.; LIFSET, R. **Taking the Circularity to the Next Level.** A Special Issue on the Circular Economy. *Journal of Industrial Ecology*. 2017.

BOGACKA, M.; PIKON, K.; LANDRAT, M. **Environmental Impact of PV Cell Waste Scenario.** *Waste Management* 70 (2017) 198–203. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X17306712?via%3Dihub>

BRASIL. **Lei nº. 12.305, de 02 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 03 ago. 2010. Disponível em: <https://goo.gl/7WqmPL> Acesso em 10/05/2017.

BRASIL. **Nota Técnica DEA 001/2017.** Projeção da Demanda de Energia Elétrica para os Próximos 10 anos (2017-2026). Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, Janeiro de 2017.

BRASIL Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC). 2017. Disponível em:

<[https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/salaImprensa/noticias/arquivos/2019/08/Estudo das Nacoes Unidas vai desenvolver modelos de economia circular no Brasil.html](https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/salaImprensa/noticias/arquivos/2019/08/Estudo%20das%20Nacoes%20Unidas%20vai%20desenvolver%20modelos%20de%20economia%20circular%20no%20Brasil.html)>. Acesso em: 02/10/2019.

BRASIL. **Ministério do Desenvolvimento Indústria e Comércio Exterior (MDIC)**. Relatório Final. Grupo de Trabalho Solar Fotovoltaico (05/12/2017 a 05/03/2018). Disponível em: <http://www.mdic.gov.br/images/REPOSITORIO/sdci/2018-Relatorio-GTFotovoltaico-Camex.pdf>

BRENNER, W.; ADAMOVIC, N. **A Circular Economy for Photovoltaic Waste – the Vision of the European Project CABRISS**. 2017 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, 2017, pp. 146-151. DOI: 10.23919/MIPRO.2017.7973407. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7973407&isnumber=7973374>

BRYMAN, A. **Research Methods and Organization Studies**. Londres: Unwin Hyman, 1989.

BYD. Especificação Técnica do Painel Solar Fotovoltaico M6K-36-SÉRIE-5BB. Disponível em: http://www.byd.ind.br/wpcontent/uploads/2018/11/0618bc_dc728f261e0546e79c2f7f06e2ce66d5.pdf. 2019.

CABRISS. **Implementation of a Circular Economy Based On Recycled, Reused and Recovered Indium, Silicon and Silver Materials for Photovoltaic and Other Applications**. (2014). Disponível em: https://www.spire2030.eu/sites/default/files/users/user357/2016_CABRISS%20leaflet%20ver1%20Print%20CMYK.pdf

CRESESB. Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio S. de Brito. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>. 2019.

CIRCLE ECONOMY. (2015). **The Potential for High-value Reuse in a Circular Economy**. Disponível em: <https://www.circulairondernemen.nl/uploads/27102a5465b3589c6b52f8e43ba9fd72.pdf>

CIRCLE ECONOMY. (2018). Disponível em: <https://www.circle-economy.com/tool/circleassessment/#.XBsNXVxKjIU>

CHOI, J.K.; FRILEY, P.; ALFSTAD, T. **Implications of Energy Policy on a Product System's Dynamic Life-Cycle Environmental Impact: Survey and Model.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, p. 9. 27 jun. 2012.

CNI. Confederação Nacional da Indústria. **Economia Circular: Oportunidades e Desafios para a Indústria Brasileira.** Brasília: CNI, 2018.

CNI. Confederação Nacional da Indústria. **Economia Circular: Caminho Estratégico.** Brasília: CNI, 2019.

COMISSÃO EUROPEIA. **Fechar o Ciclo – Plano de Ação da UE para a Economia Circular.** Comunicação da comissão ao parlamento europeu, ao conselho, ao comitê económico e social europeu e ao comitê das regiões. Bruxelas, 2.12.2015. (2015^a). Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52015DC0614&from=PT>

COMISSÃO EUROPEIA. **Closing the Loop: Helping Consumers Choose Sustainable Products and Services.** (2015b). Disponível em: https://ec.europa.eu/commission/sites/beta-political/files/circular-economy-factsheet-consumption_en.pdf

COMISSÃO EUROPEIA. **Closing the Loop: The Production Phase of the Circular Economy (2015c).** Disponível em: https://ec.europa.eu/commission/sites/beta-political/files/circular-economy-factsheet-production_en.pdf

COMISSÃO EUROPEIA. **Closing the Loop: From Waste to Resources.** (2015d). Disponível em: https://ec.europa.eu/commission/sites/beta-political/files/circular-economy-factsheet-waste-to-resources_en.pdf

COMISSÃO EUROPEIA. **Closing the Loop: Na Ambitions EU Circular Economy Package (2015e).** Disponível em: https://ec.europa.eu/commission/sites/beta-political/files/circular-economy-factsheet-general_en.pdf

COMISSÃO EUROPEIA. **Closing the Loop: Clear Targets and Tools for Better Waste Management.** (2015f). Disponível em: https://ec.europa.eu/commission/sites/beta-political/files/circular-economy-factsheet-waste-management_en.pdf

COMISSÃO EUROPEIA. **The Role of Waste-to-Energy in the Circular Economy** (2017). Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/waste/waste-to-energy.pdf>

CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C.; SILVA, S.L. **Roteiro para Revisão Bibliográfica Sistemática: Aplicação no Desenvolvimento de Produtos e Gerenciamento de Projetos.** In: 8º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto-CBGDP. 2011.

C2C. **CRADLE TO CRADLE CERTIFIED PRODUCT STANDARD – VERSION 3.0.** (2012). Disponível em: https://www.c2ccertified.org/images/uploads/C2CCertified_Product_Standard_V3_121112.pdf

DIAS, P.R. **Caracterização e Reciclagem de Módulos Fotovoltaicos (Painéis Solares).** Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, 2015.

DI MAIO, F.; REM, P.C. (2015) **A Robust Indicator for Promoting Circular Economy through Recycling.** Journal of Environmental Protection, 6, 1095-1104. <http://dx.doi.org/10.4236/jep.2015.610096>

DI MAIO, F.; REM, P.C.; BALDÉ, K.; PELDER, M. **Measuring Resource Efficiency and Circular Economy: A Market Value Approach.** Resources, Conservation and Recycling 122 (2017) 163–171.

DIAS, P. R. **Caracterização e Reciclagem de Materiais de Módulos Fotovoltaicos.** Dissertação para a obtenção do título de Mestre em Engenharia. Porto Alegre, 2015. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/127924>

EASAC. European Academies Science Advisory Council, 2015. **Circular Economy: a Commentary from the Perspectives of the Natural and Social Sciences.** Halle, Germany.

EEA, 2016. **Circular Economy in Europe - Developing the Knowledge Base (Nº 2).** European Environmental Agency. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/publications/circular-economy-in-europe>

ELIA, V.; GNONI, M.G.; TORNESE, F. **Measuring Circular Economy Strategies Through Index Methods: A Critical Analysis.** Journal of Cleaner Production 142 (2017) 2741e2751

EMF. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Circularity Indicators – An Approach to Measure Circularity.** Methodology & Project Overview. (2015).

EMF. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards de Circular Economy. Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition. Volume 1.** (2013). Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>

EMF. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Rumo à Economia Circular: O Racional De Negócio Para Acelerar A Transição.** 2015. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Rumo-a%CC%80-economia-circular Updated 08-12-15.pdf>

ELY, F; SWART, J.W. **Energia Solar Fotovoltaica de Terceira Geração.** O Setor Elétrico, outubro de 2014. Disponível em: <http://www.ieee.org.br/wp-content/uploads/2014/05/energia-solar-fotovoltaica-terceira-geracao.pdf>

EVANS, J.; BOCKEN, N. **The Circular Economy Toolkit.** Available online: <http://circulareconomytoolkit.org/> (accessed on 1 February 2017).

FALAGAS, M.E.; PITSOUNI, E.I.; MALIETZIS, G.A., PAPPAS, G. **Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: Strengths and Weaknesses.** The FASEB Journal 22(2):338-42. March. 2008.

FERREIRA, J.V.R. **Análise de Ciclo de Vida dos Produtos.** Instituto Politécnico de Viseu (2004). Disponível em: <http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/jvf/Gest%C3%A3o%20Ambiental%20-%20An%C3%A1lise%20de%20Ciclo%20de%20Vida.pdf>

FIGGE, F.; THORPE, A.S.; GIVRY, P.; CANNING, L.; FRANKLIN-JOHNSON, E. 2018. **Longevity and Circularity as Indicators of Eco-Efficient Resource Use in the Circular Economy**. *Ecological Economics* 150 (2018) 297–306

FRANKLIN-JOHNSON, E.; FIGGE, F.; CANNING, L. **Resource Duration as a Managerial Indicator for Circular Economy Performance**. *Journal of Cleaner Production* 133 (2016) 589e598.

FTHENAKIS, V. M. **End-of-life management and recycling of PV modules**. *Energy Policy* 28 (2000) 1051}1058.

GABI. **LCA and introduction to Gabi**. Thinkstep Gabi. Disponível em: http://www.gabisoftware.com/fileadmin/GaBi_Manual/GaBi_Paperclip_tutorial_Part.Pdf. (2017).

GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N. M.P.; HUKTINK, E.J. **The Circular Economy - A New Sustainability Paradigm**. *Journal of Cleaner Production*. 143, 757 e 768. (2017). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616321023>

GENG, Y.; FU, J.; SARKIS, J.; XUE, B. **Towards a National Circular Economy Indicator System in China: An Evaluation and Critical Analysis**. *Journal of Cleaner Production* 23 (2012) 216e224.

GIL, A.C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. São Paulo. 4ªEdição. Editora Atlas, 2002.

GHISELINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. **A Review on Circular Economy: The Expected Transition to a Balanced Interplay of Environmental and Economic Systems**. *Journal of Cleaner Production* 114 (2016) 11e32.

GHIZONI, J.P. **Sistemas Fotovoltaicos: Estudos sobre Reciclagem e Logística Reversa para o Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Florianópolis, SC, 2016.

GRITTITHS, P.; CAIZER, S. **Design of Indicators for Measuring Product Performance in the Circular Economy**. In 3rd International Conference on Sustainable Design and Manufacturing, SDM 2016; Springer Science and Business Media Deutschland GmbH: Berlin, Germany, 2016; pp. 307–321.

HAAS, W.; KRAUSMANN, F.; WIEDENHOFER, D.; HEINZ, M. **How Circular is the Global Economy? An Assessment of Material Flows, Waste Production, and Recycling in the European Union and the World in 2005**. Journal of Industrial Ecology (2015). DOI: 10.1111/jiec.12244.

HUGHES, R. **The EU Circular Economy Package – Life Cycle Thinking to Life Cycle Law?** Procedia CIRP 61 (2017) 10 – 16. Scientific Committee of the 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering.

HUYSMAN, S.; DE SCHAEPMEESTER, J.; RAGAERT, K.; DEWULF, J.; DE MEESTER, S. **Performance Indicators for a Circular Economy: A Case Study on Post-industrial Plastic Waste**. (2017) Resour. Conserv. Recycl. 120, 46e54.

INPE. INSTITUTO BRASILEIRO DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos, 2017. ISBN 978-85-17-00089-8

IRENA. International Renewable Energy Agency. **End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels**. (2016). Disponível em: <
http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf>

KNAG, S.; YOO, S.; LEE, J.; BOO B.; RYU, H. **Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules**. Renewable Energy 47 (2012) 152e159

KIRCHHERR, J.; REIKI, D.; HEKKERT, M. **Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions**. Resources, Conservation & Recycling (2017) 221–232. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917302835?via%3Dihub>

KORHONEN, J.; NUUR, C.; FELDMANN, A.; BIRKIE, S.E. **Circular Economy as an Essentially Contested Concept**. Journal of Cleaner Production 175 (2018) 544e552. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617330706>

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Técnicas de Pesquisa**. 5ª ed. São Paulo: Atlas, 2002.

LATUNUSSA, C., ARDENTE, F., BLENGINI, G.A., MANCINI, L. **Life Cycle Assessment of an Innovative Recycling Process for Crystalline Silicon Photovoltaic Panels**. Solar Energy Materials & Solar Cells 156 (2016) 101–111.

LEWANDOWSKI, M. **Designing the Business Models for Circular Economy Towards the Conceptual Framework**. Sustainability8. <https://doi.org/10.3390/su8010043>

LINDER, M.; SARASINI, S.; LOON, P.V. **A Metric for Quantifying Product-Level Circularity**. Journal of Industrial Ecology, 2017, Vol.21 (3), p.545-559.

LONCA, G.; MUGGEO, R. IMBEAULT-TETREAULT, H.; BERNARD, S.; MARGNI, M. **Does Material Circularity Rhyme with Environmental Efficiency? Case Studies on Used Tires**. Journal of Cleaner Production 183 (2018) 424 e 435.

LONGO, S.; BECCALI, M.; CELLURA, M.; GUARINO, F. **Energy and environmental life-cycle impacts of solar-assisted systems: The application of the tool “ELISA”**. Renewable Energy 145 (2020) 29e40.

LUZ, B.; ECHEVENGUA, C. **Gestão Empresarial para a Sustentabilidade em tempos de Mudanças Climática**. Editora Manole, 2015, – Capítulo Gestão de Ciclo de Vida como diferencial competitivo para as empresas.

MA, S.; HU, S.; CHEN, D.; ZHU, B. **A Case Study of a Phosphorus Chemical Firm's Application of Resource Efficiency and Eco-efficiency in Industrial Metabolism Under Circular Economy**. Journal of Cleaner Production 87 (2015) 839e849.

MA, S.; WEN, Z.; CHEN, J.; WEN, Z. **Mode of Circular Economy in China's Iron and Steel Industry: A Case Study in Wu'an City**. Journal of Cleaner Production 64 (2014) 505e512

MEDEIROS, I.L., VIEIRA, A., BRAVIANO, G. & GONÇALVES, B.S. **Revisão Sistemática e Bibliometria facilitadas por um Canvas**. Revista Brasileira de Design da Informação. São Paulo | v. 12 | n. 1 [2015], p. 93 – 110 | ISSN Brazilian Journal of Information Design 1808-53. Disponível em: <https://goo.gl/siej9J>. Acesso em: 15 de setembro de 2017.

MIGUEL, P. A. C. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro. 2ª Edição. Elsevier, 2012.

MERLI, R.; PREZIOSI, M. ACAMPORA, A. **How Do Scholars Approach the Circular Economy? A Systematic Literature Review**. Journal of Cleaner Production 178 (2018) 703e722.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Responsabilidade Socioambiental. Produção e consumo sustentáveis. Consumo consciente da embalagem. Impacto das embalagens no meio ambiente**. Disponível em: <<https://goo.gl/AG5ka9>> Acesso em: 30setembro 2017.

MIKHAILOVA, I. **Sustentabilidade: evolução dos conceitos teóricos e os problemas da mensuração prática**. Revista Economia e Desenvolvimento. 2004. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/eed/article/viewFile/3442/1970>.

MONIER V, HESTIN M. **Study on Photovoltaic Panels Supplementing The Impact Assessment for a Recast of The WEEE Directive**. Final Report. (2011).

MORETTI, T. V. **Método de Avaliação da Estrutura de Inventários de Ciclo de Vida: Análise para Casos Brasileiros**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 112p.

MORETTI, L.; MANDRONE, V.; D'ANDREA, A.; CARO, S. **Comparative “from Cradle to Gate” Life Cycle Assessments of Hot Mix Asphalt (HMA) Materials**. Sustainability, p. 16. 2017.

NAUSTDALSLID, J., 2014. **Circular economy in China e the environmental dimension of the harmonious society**. International Journal Sustainable Development and World Ecology, 21:4, 303-313, DOI:10.1080/13504509.2014.914599. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/13504509.2014.914599>

NIERO, M.; HAUSCHILD, M. Z. **Closing the Loop for Packaging: Finding a Framework to Operationalize Circular Economy Strategies**. Procedia Cirp, v. 61, p. 685-690, 2017

NREL. NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **Photovoltaic Research**. Colorado: NREL, 2016. Disponível em: <https://www.nrel.gov/pv/research.html>

OLIVEIRA, A.S. **Avaliação de Impactos Ambientais do Módulo Fotovoltaico: Produção e Uso como Fonte de Energia Elétrica**. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM-DM 268/2017.

OLIVEIRA, D.B.; LEBENSOLD, F.; OLIVEIRA, L.T.D. **Destinação Final das Placas Fotovoltaicas Pós Consumo no Brasil**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental. São Paulo, SP, 2017.

OTERO, J.C. **Circularity Assessment for Companies: Elements for a General Framework. Challenge Lab 2015: Sustainable Urban Development**. Master's Thesis. Department of Energy and Environment. Physical Resource Theory. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Gothenburg, Sweden 2015

OTERO, J.C.; ORDOÑEZ, I. **Circularity Assessment in Companies: Conceptual Elements for Developing Assessment Tools**. Conference: 23rd International Sustainable Development Research Society Conference. Bogotá. (2017).

PAIANO, A. **Photovoltaic waste assessment in Italy**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 41 (2015) 99–112

PARCHOMENKO, A.; NELEN, D.; GILLABEL, J.; RECHBERGER, H. **Measuring the circular economy - A Multiple Correspondence Analysis of 63 Metrics**. Journal of Cleaner Production 210 (2019) 200e216.

PARK, J.Y.; CHERTOW, M.R. **Establishing and Testing the “Reuse Potential” Indicator for Managing Wastes as Resources**. Journal of Environmental Management 137 (2014) 45e53

PICIU, G.C.; IPATE, I.; BOGDAN, A. **New Theoretical and Practical Approaches of Implementing the Circular Economy for the Preservation of Natural Resources**. Procedia Economics and Finance 22(2015)124–130. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221256711500235X>

PRIETO-SANDOVAL, V.; JACA, C.; PRMAZABAL, M. **Towards a consensus on the circular economy**. Journal of Cleaner Production 179 (2018) 605e615. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617332146>

RAGHEB, A; EL-SHIMY, H. RAGHEB, G. **Green Architecture: a concept of sustainability**. Procedia Social and Behavioral Sciences. 2015. Disponível em: http://ac-els-cdn-com.ez22.periodicos.capes.gov.br/S1877042815062552/1-s2.0-S1877042815062552-main.pdf?_tid=99e86f4a-9bfd-11e7-a6c4-00000aacb35f&acdnat=1505690097_65b232eb45a383f75af79aa733ab9768.

RAMOS, C.; RUIZ, E.T.N.F.; BICALHO, F.W.; BARBOSA, J.M.; BARROS, L.V.; RABASSA, M.M.M. **Cadeia de Valor da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil**. Brasília: SEBRAE, 2018.

REBITZER, G.; EKVALLB, T.; FRISCHKNECHT, R.; HUNKELER, D.; NORRIS, G. RYDBERG, T.; SCHIMIDT, W.P.; SUHH, S.; WEIDEMA, B.P.; PENNINGTON, D.W. **Life Cycle Assessment: Part 1: Framework, Goal and Scope Definition, Inventory Analysis and Applications**. Environment International, n. 30, p. 701-720, 2004.

RESCOM, 2018. **Circularity Calculator. Calculate the Potential Circularity and Value Capture of Different Design Strategies**. Disponível em: <http://rescomd58.share-a-space.com/Share-A-space/Content/Images/Rescom/instructions/BikeCC.pdf>

ROCKSTRÖM, J. W.; STEFFEN, K.; NOONE, Å.; PERSSON, F. S.; CHAPIN III, E.; LAMBIN, T. M.; LENTON, M.; SCHEFFER, C.; FOLKE, H.; SCHELLNHUBER, B.; NYKVIST, C. A.; DE WIT, T.; HUGHES, S.; VAN DER LEEUW, H.; RODHE, S.; SÖRLIN, P. K.; SNYDER, R.; COSTANZA, U.; SVEDIN, M.; FALKENMARK, L.; KARLBERG, R. W.; CORELL, V. J.; FABRY, J.; HANSEN, B.; WALKER, D.; LIVERMAN, K.; RICHARDSON, P.; CRUTZEN, AND J. FOLEY. 2009. **Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity**. Ecology and Society 14(2): 32. 2009. Disponível em: <https://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>

SAIDANI, M.; YANNOU, B.; LEROY, Y.; CLUZEL, F.; KENDALL, A. **A taxonomy of circular economy indicators**. Journal of Cleaner Production 207 (2019).

SCHERER, M.D. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) da produção de biodiesel de microalgas

SCHEEPENS, A. E.; VOGTLANDER J.G.; BREZET, J.C. **Two LCA Based Methods to Analyze and Design Complex (Regional) Circular Economy Systems. Case: Making Water Tourism More Sustainable**. Journal of Cleaner Production (2015), doi: 10.1016/j.jclepro.2015.05.075.

SANDER, K.; SCHILLING, S.; REINSCHMIDT, J.; WAMBACH, K.; SCHLENKER, S.; MÜLLER, A. **Study On The Development Of A Take Back And Recovery System**

For Photovoltaic Products. (2007). Disponível em: <https://www.tib.eu/en/search/id/TIBKAT%3A58852705X/Study-on-the-development-of-a-take-back-and-recovery/>

SICA, D.; MALANDRINO, O.; SUPINO, S.; TESTA, M.; LUCHETTI, M.C. **Management of end-of-life Photovoltaic Panels as a Step Towards a Circular Economy.** Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (2018) 2934–2945

SILVA, G. A.; OLIVEIRA, S. A. **Glossário de Avaliação de Ciclo de Vida.** São Bernardo do Campo, São Paulo, Brasil. 05 Mai 2014

SILVA, D.; SIMON, F. O. **Abordagem Quantitativa de Análise de Dados de Pesquisa: Construção e Validação de Escala de Atitude.** Cadernos do CERU, v. 2, n. 16, p. 11-27, 2005

SINGH, J.; ORDONEZ, I. **Resource Recovery From Post-Consumer Waste: Important Lessons for the Upcoming Circular Economy.** Journal of Cleaner Production 134 (2016) 342e353

SLAPER, T.F.; HALL, T.J. **The Triple Bottom Line: What is it and how does it work.** Indiana Business Review. 86. 4-8. (2011).

SMOL, M.; KULCZYCKA, J.; AVDIUSCHCHENKO, A. **Circular Economy Indicators in Relation to Eco-innovation in European Regions.** Clean Technologies and Environmental Policy (2017) 19:669–678.

SOUSA, S. R. **Normalização de Critérios Ambientais Aplicados à Avaliação do Ciclo de Vida.** 73 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2008.

TAMMARO, M.; RIMAURO, J.; FIANDRA, V.; SALLUZO, A. **Thermal Treatment of Waste Photovoltaic Module for Recovery and Recycling: Experimental Assessment of the Presence of Metals in the Gas Emissions and in the Ashes.** Renewable Energy 81 (2015) 103e112

TIOSSI, F.M.; SIMON, A.T.; TERNERO, E.M. **Sustentabilidade e Economia Circular: Um Estudo Sistemático da Literatura na Última Década.** XIX ENGEMA, Dezembro de 2017. Disponível em: <http://engemausp.submissao.com.br/19/anais/arquivos/272.pdf>

TIOSSI, F.M. **Sustentabilidade e Economia Circular: Uma Proposta para Integração de Indicadores de Circularidade em Relatório de Sustentabilidade.** 2019. 181 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP, Santa Bárbara d'Oeste, SP.

URBINATI, A.; CHIARONI, D.; CHIESA, V. **Towards a new taxonomy of circular economy business models.** *Journal of Cleaner Production* 168 (2017) 487e498

VELLINI, M.; GAMBINI, M.; PRATTELLA, V. **Environmental Impacts of PV Technology Throughout the Life Cycle: Importance of the end-of-life Management for Si-panels and CdTe panels.** *Energy* 138 (2017) 1099e1111. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217312069>

VERBENE, J.J.H. **Building Circularity Indicators—An Approach for Measuring Circularity of a Building.** Master's Thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, the Netherlands, 2016.

VOGTLANDER, J.G. **The Model of the Eco-Costs/Value Ratio (EVR).** Disponível em: <http://ecocostsvalue.com/EVR/model/theory/subject/8-LCA.html>

WALKER, S.; COLEMAN, N.; HODGSON, P.; COLLINS, N. **Evaluating the Environmental Dimension of Material Efficiency Strategies Relating to the Circular Economy.** *Sustainability* 2018, Volume, 10, Issue 3, 666; <https://doi.org/10.3390/su10030666>

WAMBACH, K.; SCHLENKER, S.; MÜELLER, A.; KLENK, M.; WALLAT, S.; KOPECEK, R.; WEIGRINGHAUS, E. **The Second Life Of A 300 kW PV Generator Manufactured With Recycled Wafers From The Oldest German PV Power Plant. (2006).** Disponível em: <http://isc-konstanz.de/fileadmin/1/doc/DRESDEN-WAMBACH%20et%20al..pdf>

WARODELL, E.; LINDHOLM, V. **Circular economy – the way to a more sustainable urban environment? A study of how conversion and a circular economic business model can benefit the aspects of sustainability.** *Royal Institute of Technology*, Department of Real Estate and Construction Management, Stockholm, Sweden, 2016. Disponível em: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:952140/FULLTEXT01.pdf>

WEN, Z.; MENG, X. **Quantitative Assessment of Industrial Symbiosis for the Promotion of Circular Economy: A Case Study of the Printed Circuit Boards**

Industry in China's Suzhou New District. Journal of Cleaner Production 90 (2015) 211e219.

WU, H.; SHI, Y.; XIA, Q.; ZHU, W. **Effectiveness of the Policy of Circular Economy in China: A DEA-based Analysis for the Period of 11th Five-Year-Plan.** Resources, Conservation and Recycling 83 (2014) 163–175.

ZAMAN, A.U.; LEHMANN, S. **The Zero Waste Index: A Performance Measurement Tool for Waste Management Systems in a 'Zero Waste City'.** Journal of Cleaner Production 50 (2013) 123e132.